

.....

FABIAN TITO ARANDIA MARTINEZ

**CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE
PRÉVISIONS HYDROLOGIQUES D'ENSEMBLE
MULTIMODÈLE EN CONTEXTE
OPÉRATIONNEL**

Mémoire présenté
dans le cadre du programme de maîtrise Ingénierie
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.A.)

Département des Sciences Appliquées
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
SAGUENAY

Avril 2015

Dedicace

A mi madre. Por todo su apoyo.

Remerciements

Je tiens à remercier ma directrice, Mme. Marie-Amélie Boucher, pour son appui, sa confiance, son écoute attentive et son enthousiasme légendaire. Son ample savoir en prévision hydrologique probabiliste m'ont guidé tout au long de ce travail.

Merci à mon université, l'UQAC, pour la formation reçue, le support ainsi que la confiance qu'on a déposé en moi. Je remercie tout particulièrement M. Claude Gilbert et M. Étienne Lafrenière pour leur aide tout au long de ma maîtrise.

D'autre part, j'adresse mon entière gratitude à la superbe équipe en hydrologie à l'IREQ, notamment Jocelyn Gaudet, Luc Perrault, Catherine Guay, Frédéric Guay et Louis-Alexandre Leclaire pour leur disponibilité et leur aide tout au long de mon projet. Merci pour les conseils hydrologiques et votre patience.

Je n'oublie pas non plus l'équipe d'hydrologie à l'IRSTEA en France qui m'a ouvert ses portes pour un très formateur stage de 3 mois. Ainsi que l'équipe du ECMWF en Angleterre qui m'a accueilli 1 mois durant l'été 2014. C'était un rêve pour moi de faire un stage à l'international, merci pour l'avoir rendu réalité. Merci à Maria-Helena Ramos et Florian Pappenberger pour cette opportunité.

Merci également à ma nouvelle équipe au sein de Hydro-Québec Production, c'est avec une grande fierté que je me joins à vous. Je suis très content et très motivé par ce nouveau défi.

Je tiens également à remercier tous les étudiants de l'UQAC avec qui j'ai eu le plaisir à travailler, co-habiter et discuter. Je tiens tout particulièrement à remercier Catherine Lavoie et Sandra Badani pour leur amitié et les bons moments qu'on a partagé ensemble. Le temps passé à Chicoutimi était un vrai plaisir en votre compagnie. Merci également à mon ami Guillaume Lamothe pour son aide et son écoute, c'est le seul ami avec qui je pouvais parler de fichiers binaires sans le tanner.

Un gros bisou à ma habibti Dounia, qui me donne son appui inconditionnel depuis le Cégep. Je t'appuierai comme tu l'as fait pour moi lorsque tu auras à rédiger. Et à tous ces amis que je n'ai pas vu depuis belle lurette, je ne pourrais plus vous donner l'excuse que je suis à la bibliothèque. J'ai fini !

Gracias a todos !

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
1 Introduction	1
2 Problématique et objectifs	3
2.1 Problématique principale	3
2.2 Le développement des prévisions d'ensemble chez Hydro-Québec	3
2.2.1 Les séries-mères	4
2.2.2 Vers une nouvelle approche de prévision hydrologique sur les prévisions météorologiques d'ensemble opérationnelles	6
2.3 Objectifs principaux	7
2.4 Bassins versants	7
3 La prévision hydrologique d'ensemble : état de l'art	13
3.1 Introduction	13
3.2 Prévisions météorologiques	13
3.3 Modèles hydrologiques	18
3.4 Prévisions hydrologiques	19
3.5 Approche multimodèle	21
3.5.1 Multi-modèle hydrologique	22
3.5.2 Multi-modèle météorologique	23
3.6 Qualité des prévisions d'ensemble	23
3.7 Méthodes de post-traitement	25
4 Approche méthodologique	27
4.1 Considérations générales	27
4.2 Le modèle hydrologique HSAMI	28
4.3 Prévisions météorologiques	29

4.3.1	Meteorological Service of Canada (MSC)	32
4.3.2	Centre Météorologique Américain (NCEP)	32
4.3.3	European Center of Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)	33
4.4	Mesure de la performance des prévisions	33
4.4.1	Le Continuous Ranked Probability Score (CRPS)	34
4.4.2	Histogramme de rang	35
4.4.3	Erreur absolue moyenne	37
4.5	Pré-traitement et post-traitement	37
4.5.1	Pré-traitement	38
4.5.2	Bayesian Model Averaging (BMA)	38
5	Résultats	45
5.1	Prévisions météorologiques	45
5.1.1	Baskatong	45
5.1.2	La Grande 4	49
5.1.3	Outardes 4	53
5.2	Prévisions hydrologiques brutes et post-traitées	54
5.2.1	Baskatong	55
5.2.2	La Grande 4	63
5.2.3	Outardes 4	71
5.3	Prévisions hydrologiques pré-traitées	79
5.3.1	Baskatong	80
5.3.2	La Grande 4	85
5.3.3	Outardes 4	91
6	Conclusions et perspectives	97
A	Prévisions météorologiques brutes	100
A.1	Baskatong	100
A.2	Outardes 4	101
B	Poids du BMA	104
B.1	Outardes 4	104
	Références	106

Liste des tableaux

2.1	Quantiles des débits historiques pour les bassins versants de La Grande 4, Outardes 4 et Baskatong	9
3.1	Caractéristiques des centres météorologiques et des prévisions disponibles sur la base de données TIGGE	16
4.1	Prévisions météorologiques utilisées dans le projet	31
4.2	Coordonnées en latitude et longitude des centroïdes des bassins versants .	31
5.1	Membres aberrants retirés du Grand Ensemble pour Outardes 4 et La Grande 4	79

Liste des figures

2.1	Cascade des incertitudes dans la prévision hydrologique	4
2.2	Emplacement des bassins versants de La Grande-4, Baskatong et Outardes 4 au Québec	8
2.3	Hydrogramme des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 . . .	10
2.4	Hydrogramme des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 . .	11
2.5	Hydrogramme des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 . .	12
3.1	Processus de production des prévisions d'ensemble par le NCEP (adapté de Schaake et al., 2009)	14
3.2	Représentation de la résolution horizontale et verticale des modèles atmosphériques (Source : http://www.ems.psu.edu/)	15
3.3	Prévision d'ensemble pour la précipitation cumulée pour un horizon de 12h valide le 13 Janvier 2015 à 1200 UTC. Le contrôle et 7 membres sur 20 du MSC sont montrés dans cette figure. (source : http://weather.gc.ca/)	17
3.4	Transition de prévisions hydrologiques d'ensemble à fonction de densité de probabilité cumulative pour un horizon donné (adapté de : IPH – UFRGS)	24
3.5	Différence entre fiabilité et résolution dans les prévisions hydrologiques d'ensemble (source : notes de cours 6MDI868-Sujets spéciaux en hydrologie)	25
3.6	Exemple de traitement du biais et de la dispersion sur des prévisions d'ensemble fictives (source : notes de cours 6MDI868-Sujets spéciaux en hydrologie)	26
4.1	Processus de production des prévisions hydrologiques d'ensemble	27
4.2	Schéma du fonctionnement du modèle hydrologique HSAMI (Fortin, 2000)	29
4.3	Exemple de calcul du CRPS sur la température (Tiré de : EUMETCAL)	34
4.4	Interprétation de l'histogramme de rang (tiré de Wilks, 2011)	36
4.5	Représentation de la fonction de densité de probabilité de la BMA (Tiré de Raftery et al., 2005	43
5.1	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie de Baskatong	46

5.2	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale sur Baskatong	47
5.3	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale sur Baskatong	48
5.4	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie de La Grande 4	49
5.5	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige de La Grande 4	50
5.6	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale sur La Grande 4	51
5.7	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale sur La Grande 4	52
5.8	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie pour Outardes 4	53
5.9	Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	55
5.10	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	56
5.11	Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	56
5.12	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	57
5.13	Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	57
5.14	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	58
5.15	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA de Baskatong pour chaque horizon de prévision	59
5.16	Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour Baskatong de 2011 à 2013	60
5.17	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour Baskatong de 2011 à 2013	61
5.18	Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour Baskatong	62
5.19	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	64
5.20	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	64

5.21	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	65
5.22	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	65
5.23	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	66
5.24	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	66
5.25	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA gamma de La Grande-4 pour chaque horizon de prévision	67
5.26	Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour La Grande-4 de 2011 à 2013	68
5.27	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour La Grande-4 de 2011 à 2013	69
5.28	Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour La Grande 4 pour chaque horizon de prévision	70
5.29	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	71
5.30	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	72
5.31	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	72
5.32	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour	73
5.33	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	73
5.34	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour	74
5.35	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA gamma de Outardes-4 pour chaque horizon de prévision	75
5.36	Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour Outardes-4 de 2011 à 2013	76
5.37	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour Outardes-4 de 2011 à 2013	77
5.38	Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour Outardes 4 pour chaque horizon de prévision	78
5.39	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour	80

5.40	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour	81
5.41	Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour	81
5.42	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de Baskatong pour chaque horizon de prévision	82
5.43	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l’aide du BMA normal pour Baskatong de 2011 à 2013	84
5.44	Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 1 jour	85
5.45	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 1 jour	86
5.46	Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour	86
5.47	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour	87
5.48	Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour	87
5.49	Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour	88
5.50	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de La Grande-4 pour chaque horizon de prévision	89
5.51	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l’aide du BMA normal pour La Grande-4 de 2011 à 2013	90
5.52	Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 1 jour	91
5.53	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 1 jour	92
5.54	Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour	92
5.55	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour	93
5.56	Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour	93
5.57	Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour	94

5.58	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de Outardes 4 pour chaque horizon de prévision	95
5.59	Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA normal pour Outardes 4 de 2011 à 2013	96
A.1	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige de Baskatong	100
A.2	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale pour Outardes 4	101
A.3	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale pour Outardes 4	102
A.4	Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige pour Outardes 4	103
B.1	Comparaison des valeurs des poids du BMA gamma, des hydrogrammes prévus et de l'hydrogramme observé pour le jour 5 à Outardes 4	104
B.2	Comparaison des valeurs des poids du BMA normal, des hydrogrammes prévus et de l'hydrogramme observé pour le jour 5 à Outardes 4	105

Chapitre 1

Introduction

L'incertitude liée aux conditions météorologiques est une des grandes problématiques de la prévision hydrologique. L'incertitude inhérente aux prévisions hydrologiques est due aux nombreuses manipulations qu'il faut effectuer pour transformer l'intrant météorologique en débit prévu pour un site en particulier. D'autre part, l'incertitude liée aux prévisions météorologiques est due aux conditions initiales et à la modélisation des phénomènes physiques. Les conditions initiales d'un modèle météorologique sont incertaines car on ne peut connaître avec exactitude l'état de l'atmosphère à un moment donné. De plus, les modèles sont des simplifications des phénomènes physiques complexes de l'atmosphère. En fait, une prévision de débit est l'aboutissement d'un processus de traitement des données impliquant les modèles de prévision météorologiques, des méthodes de pré-traitement ([Zalachori, Ramos, Garçon, Mathevet, & Gailhard, 2012](#)), des modèles hydrologiques, des méthodes de post-traitement et des modèles d'aide à la décision. Évidemment, les modèles sont des simplifications de phénomènes physiques complexes et comportent eux aussi une part d'incertitude inhérente aux processus représentés.

La modélisation atmosphérique est un processus dynamique ([Lorenz, 1963](#)) et difficilement prévisible de par sa sensibilité aux états initiaux du modèle. De ce fait, les météorologues s'efforcent depuis les années 90 à considérer les différentes sources d'incertitude telle celle sur les conditions initiales et celle sur les paramètres dans les modèles atmosphériques. Ce changement de paradigme ne s'est cependant pas tout à fait complété dans le domaine de la prévision hydrologique opérationnelle. En effet, plusieurs centres continuent à se baser sur la méthodologie déterministe pour émettre leurs prévisions. Ceci est dû notamment à la difficulté à prévoir des événements de pluie par les modèles atmosphériques. Étant donné que les précipitations sont des phénomènes très localisés, il est difficile de prévoir leur lieu exact d'occurrence. De plus, les précipitations, qu'elles soient liquides ou sous forme de neige, sont les variables d'entrée les plus importants d'un modèle hydrologique. Heureusement, malgré les difficultés mentionnées précédemment, la capacité de représenter les événements de précipitation s'est grandement améliorée à travers les années. Un nombre croissant d'agences hydrologiques à travers le monde utilisent les prévisions d'ensemble dans un cadre opérationnel, notam-

ment le EFAS (European Flood Alert System) (Thielen, Bartholmes, Ramos, De Roo, et al., 2008).

Il est clair que le processus de production des prévisions hydrologiques contient plusieurs sources d'incertitude qui peuvent entraîner de graves conséquences pour les prévisions subséquentes. Il est scientifiquement plus correct de considérer et de traiter l'incertitude du modèle que de se limiter à des prévisions qui ne la considèrent pas.

De l'acceptation de cette incertitude est née l'approche probabiliste. Cette approche nécessite donc de créer des membres à partir d'états initiaux perturbés. Cette procédure était impossible il y a une trentaine d'années de par la capacité de calcul informatique qu'elle nécessite. De nos jours, la prévision météorologique probabiliste est la norme et est effectuée différemment pour chacun des centres météorologiques mondiaux. De plus, la résolution spatiale de ces prévisions données sous forme de grilles s'est grandement améliorée de manière à ce qu'elle soit adéquate pour la prévision hydrologique. La résolution spatiale plus fine des grilles de prévision permet de mieux décrire le champs de précipitation sur le bassin et donc d'améliorer la prévision hydrologique.

Le premier objectif de ce projet de maîtrise est une analyse de l'inclusion de deux sources d'incertitude dans le processus de production de prévisions hydrologiques soit celle du choix de modèle atmosphérique ainsi que celle des conditions initiales et de la représentation physique de l'atmosphère. L'approche multi-modèle météorologique sera évaluée pour l'émission des prévisions d'ensemble hydrologiques. Cette analyse a pour but de comparer la performance d'un système de prévision multi-modèle météorologique avec la méthodologie couramment en vigueur chez Hydro-Québec qui est plutôt basée sur la climatologie.

Le deuxième objectif est de tester une méthode de post-traitement multi-modèle appelée le "Bayesian Model Averaging" (BMA) pour combiner les prévisions multi-modèles en une seule distribution prédictive. Le BMA permettra aussi d'attribuer à chaque modèle atmosphérique un poids représentatif de sa crédibilité déterminée lors d'une période d'entraînement.

Des prévisions météorologiques provenant des modèles atmosphériques canadiens, américains et européens serviront à produire des prévisions hydrologiques sur trois bassins versants québécois soit La-Grande 4, Outardes 4 et Baskatong. Les performances de ces prévisions seront ensuite comparées à celle des prévisions opérationnelles brutes provenant d'Hydro-Québec.

Ce mémoire de maîtrise se divise en 5 chapitres soit la problématique, la revue de littérature, l'approche méthodologique, la présentation des résultats et la conclusion.

Chapitre 2

Problématique et objectifs

2.1 Problématique principale

La gestion des ressources hydriques dans un contexte de production hydro-électrique nécessite d'anticiper les apports en eau à différentes échéances afin d'optimiser l'utilisation de la ressource. Afin d'effectuer ceci, les variables météorologiques futures telles la température maximale, température minimale ainsi que la précipitation totale doivent être estimées.

Les prévisions de débit sont effectuées par le couplage entre les prévisions météorologiques et un modèle hydrologique calibré adéquatement pour un bassin versant donné. Ce sont les hydrologues qui sont chargés d'assurer la validité des prévisions de par leur connaissance du régime hydrologique du bassin versant, du modèle hydrologique, leur regard critique sur les prévisions météorologiques en intrant ainsi que des outils de vérification adéquats. Cette pratique est appelée prévision hydrologique opérationnelle.

La plus grande difficulté de la prévision en général est que l'on doit composer avec des incertitudes provenant de diverses étapes dans le processus de prévision comme il est représenté à la figure 2.1.

Toutes ces sources d'incertitude font que la prévisibilité des phénomènes météorologiques est très difficile à cerner. En fait, il sera vu dans le chapitre 3 que l'approche probabiliste, aussi appelée prévision d'ensemble, est une méthodologie qui aide à quantifier ces incertitudes afin de faire des prévisions plus complètes. C'est pour cette raison que différentes institutions à travers le monde utilisent l'approche probabiliste comme outil d'aide à prise de la décision.

2.2 Le développement des prévisions d'ensemble chez Hydro-Québec

Il existe plusieurs types d'institutions à travers le monde qui émettent des prévisions hydrologiques. Il existe donc des routines de traitement des prévisions construites à

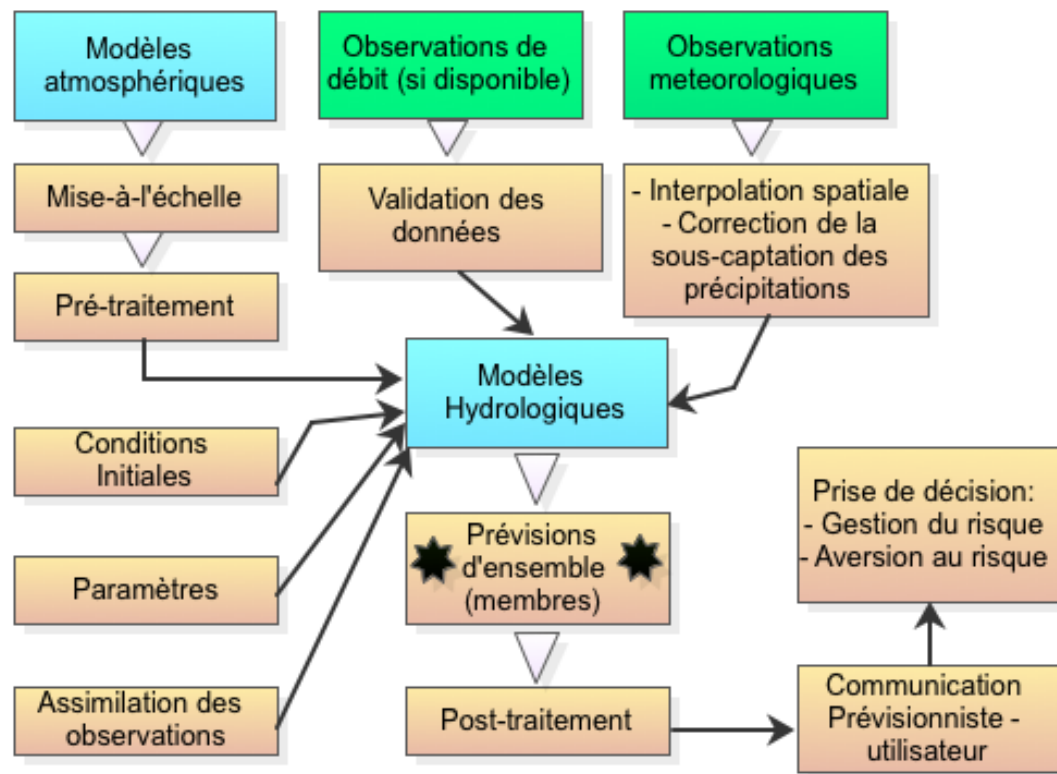


FIGURE 2.1 – Cascade des incertitudes dans la prévision hydrologique

l'interne spécifiques à l'institution qui les émet. Depuis 1983, la division Production d'Hydro-Québec émet des prévisions hydrologiques d'ensemble produites à l'interne et appelées les séries-mères. La dernière mise-à-jour majeure du système a eu lieu en 2005.

2.2.1 Les séries-mères

Les séries-mères sont le résultat d'un traitement statistique des prévisions météorologiques déterministes issues du centre météorologique canadien qui sont ensuite passées à travers le modèle hydrologique HSAMI (V. Fortin, 2000). La conception de la prévision météorologique probabiliste d'Hydro-Québec Production peut être consultée dans la présentation technique interne (Hydro-Québec, 17 janvier 2013).

La première étape consiste à recueillir les prévisions météorologiques déterministes provenant du modèle régional et global d'Environnement Canada. Une analyse des contextes météorologiques actuels et passés ainsi que d'une analyse des prévisions météorologiques provenant d'autres centres météorologiques est effectuée. Suite à ces analyses, le météorologue fait des modifications manuelles basées sur son expertise. Par la suite, des grilles expertisées de prévisions de température minimale, température maximale et de précipitation totale sont produites pour un horizon de 5 à 9 jours. Ensuite,

après séparation de la précipitation totale en neige et pluie, l'interpolation des grilles déterministes sur les bassins versants est effectuée.

La deuxième étape consiste à construire des scénarios météorologiques équiprobables à partir des prévisions météorologiques déterministes expertisées produites à la première étape. La méthode de construction des scénarios requiert de chercher des couples observations-prévisions dans l'historique d'Hydro-Québec basée sur les prévisions actuelles. Ces analogues se doivent de respecter un seuil de comparaison afin que les scénarios soient considérés comme analogues. C'est-à-dire qu'il y a une tolérance pour considérer deux scénarios comme étant analogues. Par exemple, cette tolérance peut-être exprimée sous forme d'une différence de température, précipitation totale ou emplacement des champs de basse pression.

Cette façon de procéder s'apparente à la méthode des analogues. Cette méthode sert à créer des prévisions d'ensemble à partir de prévisions déterministes en utilisant l'historique météorologique (climatologie). La méthode des analogues consiste à utiliser l'historique d'une variable en particulier (ex. les champs de pression) afin de prévoir l'état de cette même variable à différents horizons. Pour ce faire, le prévisionniste se doit de trouver des situations atmosphériques initialement très similaires l'une de l'autre selon un certain critère particulier. La méthode des analogues se veut une alternative aux modèles numériques de l'atmosphère qui se base sur les tendances déterminées empiriquement grâce aux bases de données climatiques au lieu d'avoir recours à la modélisation de la dynamique de l'atmosphère. L'article de [Van den Dool \(1989\)](#), traite de l'utilisation de la méthode des analogues en restreignant les limites géographiques de recherche à un rayon donné. Ceci a pour effet d'accroître le nombre d'analogues possibles pour une prévision.

Cette méthodologie comporte certaines limitations dont le fait qu'elle ne soit pas basée sur l'incertitude des modèles atmosphériques et plutôt sur l'erreur historique du météorologue. Ceci fait que l'on n'a pas une vraie estimation de l'incertitude liée aux modèles atmosphériques, ce qui pourrait induire la prévision en erreur. De plus, les analogues sélectionnés sont indépendants d'un bassin à l'autre. Ce manque de cohésion ne nous permet donc pas de déterminer quelles sont les vraies sources d'incertitude. Finalement, l'historique d'Hydro-Québec est relativement court (50 ans). Par conséquent il est légitime de se demander si cette base de données est suffisante pour évaluer l'incertitude des prévisions météorologiques par la méthode des analogues.

Il y a déjà eu par le passé des projets pour intégrer les prévisions d'ensemble météorologiques dans le processus opérationnel de gestion des ressources hydriques d'Hydro-Québec, notamment en 2005 ([Evora, 2005](#)). Cependant, ce projet s'est soldé par les constations suivantes :

- 1) Les prévisions d'ensemble sont biaisées et sous-dispersées.

- 2) Les différents membres des précipitations d'ensemble ne sont pas équiprobables.

Depuis cet essai en 2005, les modèles météorologiques de tous les centres de prévision atmosphérique dans le monde se sont beaucoup améliorés en termes de représentation de la physique des phénomènes du climat, de la résolution spatiale des grilles ainsi que dans la méthodologie de perturbation des états initiaux des modèles.

2.2.2 Vers une nouvelle approche de prévision hydrologique sur les prévisions météorologiques d'ensemble opérationnelles

L'amélioration notoire des modèles atmosphériques laisse entrevoir un potentiel à utiliser les prévisions météorologiques comme base à la prévision hydrologique à la place d'utiliser des méthodes d'analogues basées sur l'historique alors que le climat n'est pas stationnaire.

Plusieurs organismes utilisent les prévisions météorologiques de court à moyen terme comme intrants à un modèle hydrologique pour produire des prévisions de débit en contexte pré-opérationnel ou opérationnel. Une liste de ces organismes a été publiée dans [Clope et Pappenberger \(2009\)](#).

L'exemple le plus abouti est EFAS (European Flood Awareness System), ce système émet les prévisions hydrologiques à travers l'Europe ([Thielen, Bartholmes, Ramos, & Roo, 2009](#) ; [Bartholmes, Thielen, Ramos, & Gentilini, 2009](#)). Ce système de prévision émettant des prévisions jusqu'à un horizon de 10 jours en avance est opérationnel depuis l'automne 2012.

La motivation qui a poussé à la création d'un tel système sont les crues sur les rivières du Danube et de l'Elbe en 2002. En fait, la gestion de ces crues importantes crue a été marquée par des prévisions non-cohérentes provenant de diverses sources et de qualité variable car produites de manière différente. L'objectif de EFAS est pouvoir anticiper les crues importantes afin de mettre en place des mesures préventives à travers l'Europe.

Le modèle EFAS a donné des résultats encourageants pour la prévision de crues importantes. Par exemple, les prévisions EFAS ont été en mesure d'anticiper la crue jusqu'à 8 à 10 jours à l'avance pour la crue de 2006 sur le bassin tchèque Elbe ([Younis, Ramos, & Thielen, 2008](#)). Ce qui est d'autant plus encourageant est que cette crue a été causée par la fonte des neiges, cas souvent retrouvé dans les bassins à régime nordique du Québec.

Il serait intéressant de voir si les prévision météorologiques d'ensemble de court à moyen terme peuvent égaler voire rivaliser les séries-mères. La question est de savoir si les prévisions d'ensemble hydrologiques produites avec les sorties des centres météorologiques pourraient donner une estimation plus adéquate de l'incertitude et ainsi

servir à la gestion des ressources hydriques. L'hypothèse adoptée dans ce travail c'est que l'utilisation des prévisions d'ensemble serait plus adéquate scientifiquement et plus performante lorsque comparée aux séries-mères.

2.3 Objectifs principaux

Considérant les besoins opérationnels d'Hydro-Québec en termes de prévisions hydrologiques d'ensemble pour l'estimation de l'incertitude sur les débits futurs, Les trois objectifs principaux de ce projet de recherche sont de :

- 1) Comparer les prévisions hydrologiques faites avec les séries-mères d'Hydro-Québec avec celles produites à partir de véritables prévisions météorologiques d'ensemble.
- 2) Comparer la qualité des prévisions météorologiques des trois centres de prévision atmosphérique les plus populaires au monde, dans le contexte de la production de prévision hydrologique d'ensemble
- 3) Tester des combinaisons de prévisions météorologiques pondérées afin d'obtenir des prévisions hydrologiques d'ensembles qui traduisent fidèlement l'incertitude prévisionnelle.

2.4 Bassins versants

Les bassins versants à l'étude sont Baskatong, La Grande-4 et Outardes-4. Ces bassins ont été choisis à cause de l'intérêt économique qu'ils comportent pour la production d'hydro-électricité. La figure 2.2 illustre l'emplacement des différents bassins versants dans la province de Québec.

Les trois bassins ont des caractéristiques différentes qui influencent le régime hydrologique. Le débit de base de La Grande-4 est beaucoup plus grand que les deux autres bassins versants. Cependant, les pointes de débit pour Baskatong et Outardes 4 sont plus élevées comparativement à La Grande 4.

De plus, il y a peu d'évènements convectifs de précipitation sur le bassin de La Grande 4, qui est situé au nord du Québec, alors que ce genre d'évènements est fréquent pour Baskatong et Outardes 4.

Le réservoir Baskatong est un élargissement de la rivière Gatineau. La centrale Mercier se trouve à l'exutoire du réservoir Baskatong et a une puissance installée de 60 MW. Le potentiel de production de Baskatong est de 0.28 TWh annuellement. En fait, Baskatong étant la principale réserve d'eau aménagée sur la rivière Gatineau et ce bassin joue un rôle de régulation aux centrales à l'aval telles que Paugan, Chelsea et Rapides-Farmers ayant une puissance installée respective de 236, 144 et 106 MW. De plus, il y a des zones habitées au sud de la rivière Gatineau ainsi que des écosystèmes protégés donc la gestion de ce bassin est une question de sécurité publique autant que d'intérêt économique.



FIGURE 2.2 – Emplacement des bassins versants de La Grande-4, Baskatong et Outardes 4 au Québec

La configuration de Baskatong et du bassin intermédiaire Ceizur donnent une superficie totale de 13057 km^2 . C'est cette superficie et les débits correspondants qui sera

à l'étude dans ce projet. Afin de simplifier, il ne sera fait mention que de Baskatong pour le reste du manuscrit.

La Grande 4 se trouve sur l'est du bassin versant de la Baie James. Le réservoir de la Grande 4 a une superficie de 765 km^2 et une puissance installée de 2779 MW faisant d'elle une des rivières les plus importantes de la province en terme de production hydro-électrique.

La centrale hydraulique aux Outardes possède une puissance installée de 785 MW et a été mise en service en 1969. Le réservoir créé par la construction d'Outardes 4 couvre une superficie de 625 km^2 . Sa superficie est couverte dans sa quasi-totalité par la forêt et l'activité économique principale est l'exploitation du bois.

Le tableau 2.1 présente divers quantiles calculés sur un historique de 50 ans sur les trois bassins versants à l'étude. Ce tableau démontre la différence dans les régimes hydrologiques des trois bassins.

TABLEAU 2.1: Quantiles des débits historiques pour les bassins versants de La Grande 4, Outardes 4 et Baskatong

Bassins Versants	Superficie (km^2)	Q0,25 (m^3/s)	Q25 (m^3/s)	Q75 (m^3/s)	Q97,5 (m^3/s)
LA GRANDE 4	28443	126	274	762	1318
OUTARDES 4	17119	67	142	430	1363
BASKATONG	13057	21	82	281	969

Les trois années d'historique des débits pour chaque bassin présentent des événements d'intérêt avec lesquels l'application de la méthode de combinaison des modèles sera évaluée. Les hydrogrammes suivants sont l'historique des années à l'étude pour les trois bassins versants.

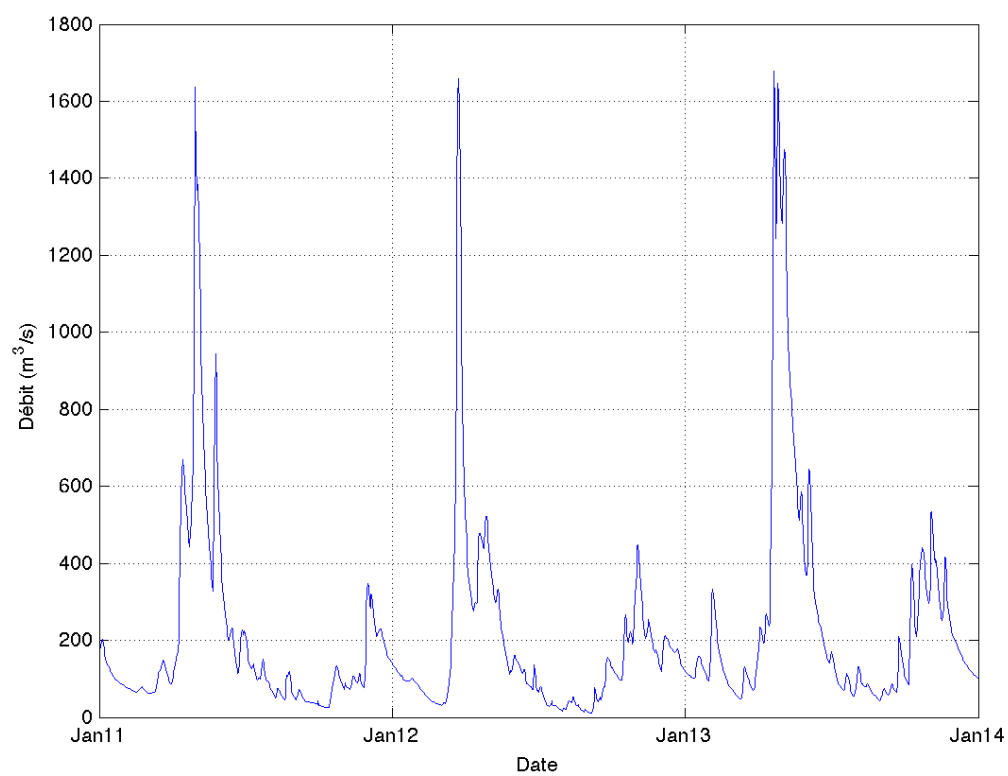


FIGURE 2.3 – Hydrogramme des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013

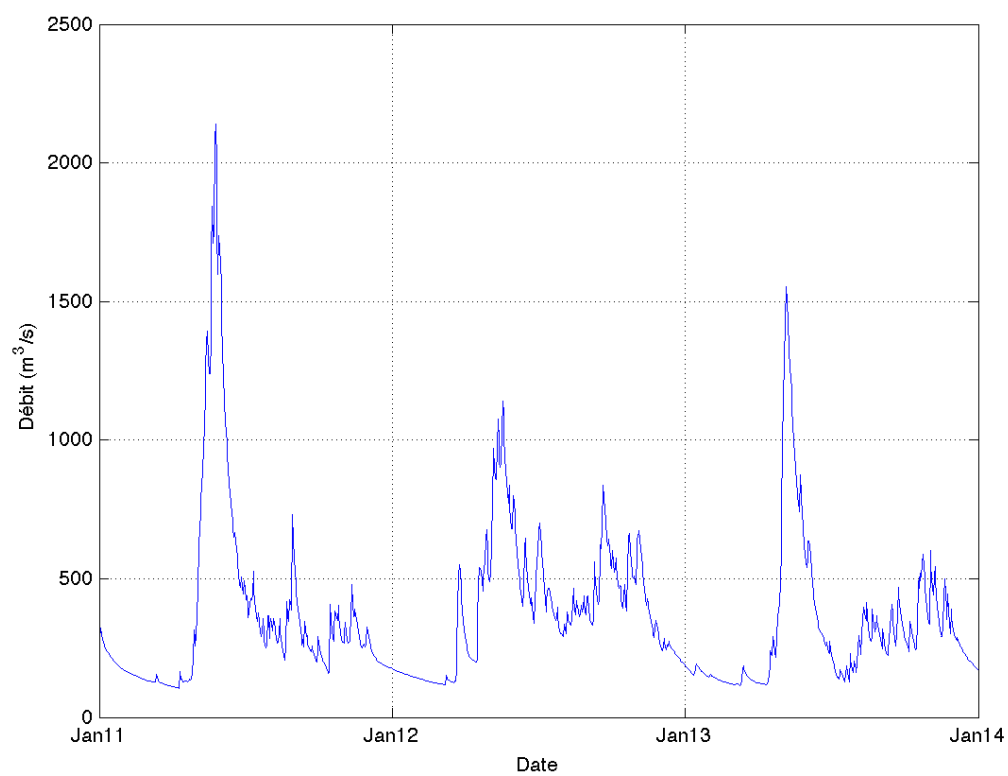


FIGURE 2.4 – Hydrogramme des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013

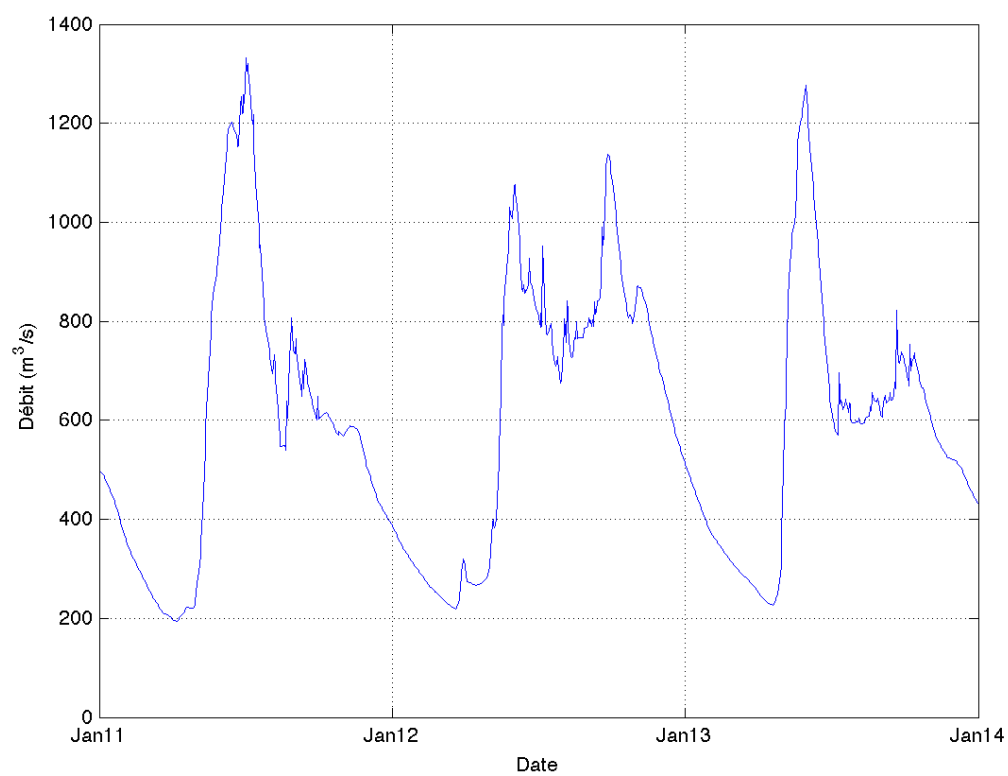


FIGURE 2.5 – Hydrogramme des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013

Chapitre 3

La prévision hydrologique d'ensemble : état de l'art

3.1 Introduction

Les systèmes de prévision hydrologique sont l'aboutissement de plusieurs années de développements dans les sciences atmosphériques ainsi que dans la compréhension du cycle de l'eau. La prévision hydrologique est l'usage conjoint des deux sciences afin d'avoir un aperçu du transport des volumes d'eau dans le territoire concerné. La figure 3.1 montre un schéma du processus-type suivi par le NCEP (National Center for Environmental Prediction - États-Unis) pour produire des prévisions hydrologiques d'ensemble.

Cette figure montre comment un système moderne de prévision hydrologique incorpore le modèle météorologique et le modèle hydrologique dans sa structure. Ces deux modèles, ayant chacun leurs incertitudes respectives, doivent subir un traitement de leur biais et leur dispersion. Ce couplage de modèles météorologiques-hydrologiques est l'aboutissement de plusieurs années de développement de chacun des modèles.

Afin de cerner la complexité du problème de la prévision hydrologique, il faut tout d'abord connaître les fondements des modèles météorologiques et hydrologiques. Ces fondements permettent d'estimer les sources d'incertitude inhérentes à ces outils. Le concept de représentation de l'incertitude est très important et c'est ce qui a motivé les approches dites multi-modèle ainsi que le post-traitement des prévisions probabilistes.

3.2 Prévisions météorologiques

Les prévisions météorologiques constituent l'intrant de base pour émettre des prévisions hydrologiques couvrant divers horizons au-delà des temps de réponse naturels des bassins versants. Des notions quant à la façon de prévoir le mouvement des fluides atmosphériques ont été émises pour la première fois au début des années 1920 dans

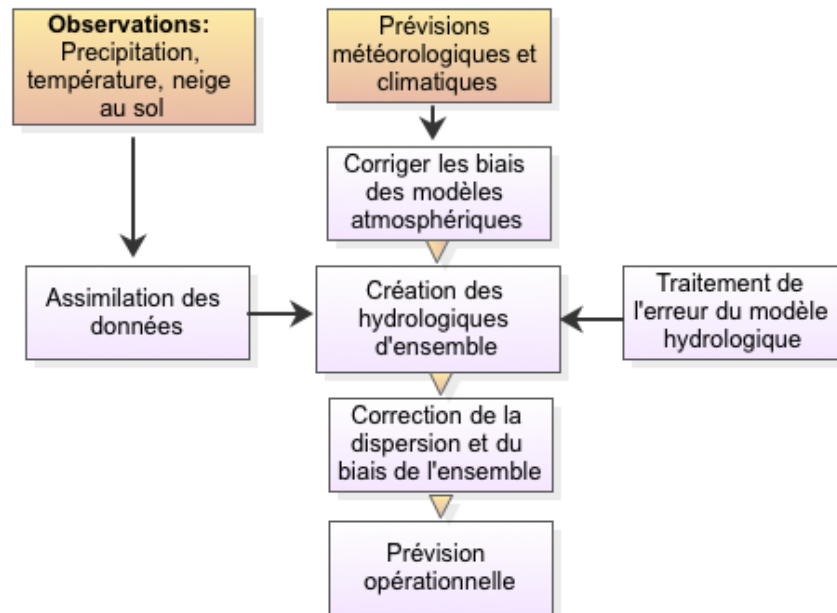


FIGURE 3.1 – Processus de production des prévisions d'ensemble par le NCEP (adapté de Schaake et al., 2009)

l'ouvrage "Weather Prediction By Numerical Process" ([Richardson, 1922](#)). Cet ouvrage préconisait la modélisation de la dynamique de l'atmosphère en calculant des milliers d'équations afin de prévoir son état futur, et ce en séparant la surface du globe en points de grille. L'auteur estimait toutefois que 64000 personnes seraient nécessaires afin de résoudre ces équations à temps pour que ladite prévision soit utile, c'est-à-dire avant que l'observation ne se réalise.

Les bases du premier modèle météorologique ayant connu du succès ont été érigées vers la fin des années 40 ([Charney, 1948](#)). À cette époque, les scientifiques ont modélisé les mouvements atmosphériques selon un modèle quasi géostrophique, c'est-à-dire que les effets inertiels sont négligeables par rapport à la force de Coriolis et que la profondeur des océans est faible par rapport à sa largeur ainsi que d'autres hypothèses simplificatrices. De cette manière, les équations sont beaucoup plus simples à résoudre, ce qui permettait aux ordinateurs de l'époque d'exécuter les calculs. Par la suite, les modèles atmosphériques ont continué à se développer au fur et à mesure que la capacité de calcul informatique l'a permis. Actuellement, les centres météorologiques mondiaux sont dotés de super-ordinateurs parmi les plus performants au monde (ex. [Meuer, Strohmaier, Simon, & Dongarra, 2013](#)).

Les réalisations des modèles atmosphériques à différentes échelles sont nommées NWP (Numerical Weather Prediction) dans la littérature. Les sorties de ces modèles (exemple : température de l'air, précipitations cumulées, etc.) sont représentées comme

des valeurs à différents points de grille. Les grilles recouvrent la planète à différentes résolutions spatiales (horizontales et verticales) selon le modèle météorologique considéré. Les échelles de ces modèles peuvent être locales, régionales et globales. La figure 3.2 démontre la résolution horizontale et verticale des modèles atmosphériques. Chacune des variables météorologiques est calculée pour chaque point de grille.

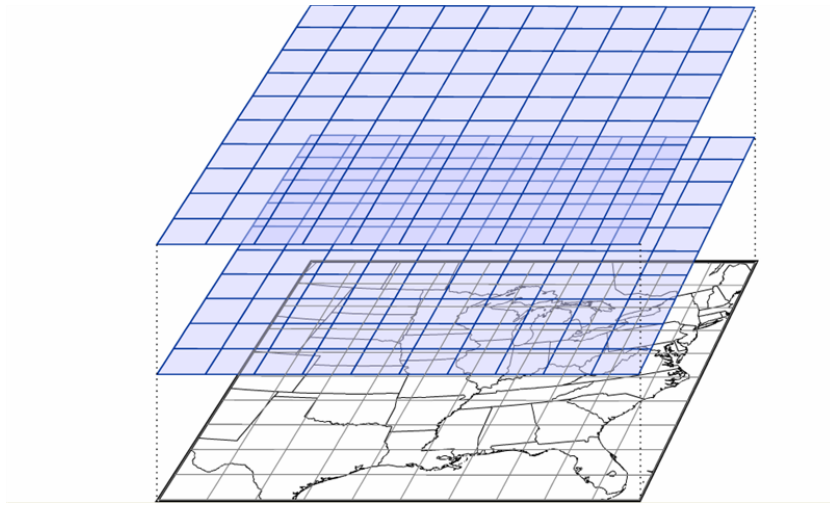


FIGURE 3.2 – Représentation de la résolution horizontale et verticale des modèles atmosphériques (Source : <http://www.ems.psu.edu/>)

Ces modèles nécessitent l'ajustement de paramètres et sont composés de divers modules représentant les processus physiques de l'atmosphère. Les modèles NWP nécessitent également une estimation des conditions initiales de l'état de l'atmosphère afin d'être initialisés et pouvoir émettre des prévisions à différentes échéances temporelles.

Les centres météorologiques offrent divers produits aux utilisateurs, dont les prévisions de court à moyen terme qui peuvent se diviser en deux classes : les prévisions déterministes et les prévisions probabilistes.

Les prévisions météorologiques déterministes sont obtenues à partir de la meilleure estimation actuelle disponible pour l'état initial de l'atmosphère au moment de son émission. Il existe par contre une incertitude sur cet état initial, et une petite erreur dans l'estimation des conditions initiales peut donner lieu à une très grande erreur dans la prévision, surtout à des horizons de plusieurs jours. Cet effet fut découvert par Lorenz (1963). Les prévisions météorologiques d'ensemble permettent de tenir compte, entre autres, de cette incertitude.

Les systèmes de prévisions d'ensemble sont des systèmes de prévision numérique de l'atmosphère dont les conditions initiales et des paramètres physiques ont été altérées. Chacune de ces altérations représente un état initial possible pour l'atmosphère et la prévision résultante correspond à une réalisation probable du modèle. Chaque réalisation est appelée "membre" de la prévision d'ensemble. Le tableau 3.1 contient les modèles météorologiques disponibles dans la base de données TIGGE ainsi que leurs

caractéristiques originales. Les résolutions présentées dans ce tableau ne sont pas nécessairement celles qui sont disponibles pour téléchargement. Plus de détails sur cette spécificité est discutée dans la section 4.1.

TABLEAU 3.1: Caractéristiques des centres météorologiques et des prévisions disponibles sur la base de données TIGGE

Pays	Organisation (Code)	Localisation du centre	Membres	Horizon Maximal (Jours)	Résolution (degrés)
Australie	Bureau of Meteorology (AMMC)	Melbourne	32	10	TL119 (1.5x1.5)
Canada	Meteorological Service of Canada (CWAO)	Montréal	20	15	600x300 (0.6x0.6)
Chine	National Climate Center of China Meteorological Administration (CMA)	Beijing	14	10	T213 (0.84x0.84)
Japon	Japan Meteorological Agency (RJTD)	Tokyo	50	9	TL319 (0.56x0.56)
Corée	Korean Meteorological Administration (RKSL)	Seoul	16	10	T213 (0.84x0.84)
Royaume-Uni	Met Office (EGRR)	Exeter	23	15	(0.55x0.83)
États-Unis	National Centers for Environmental Prediction (KWBC)	Washington	20	15	T190 (0.90x0.90)
Europe	European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMF)	Reading	50	15	TL319 (0.56x0.56)

Dans la figure 3.3 on peut apercevoir la différence entre les 7 premiers membres du modèle canadien ainsi que la prévision déterministe et le membre contrôle pour la précipitation cumulée d'horizon 12h valide pour le 13 Janvier 2015 à 12H00 UTC. Les quantités de pluie entre les divers scénarios différent ainsi que la localisation du système prévu, par contre ces différences suivent toutes une tendance et donnent une idée de l'ordre de grandeur de l'évènement. Ces scénarios peuvent servir à mieux évaluer le risque hydrologique dans un contexte opérationnel en calculant des probabilités de dépassement de certains évènements qui pourraient s'avérer problématiques pour la gestion des ressources hydriques.

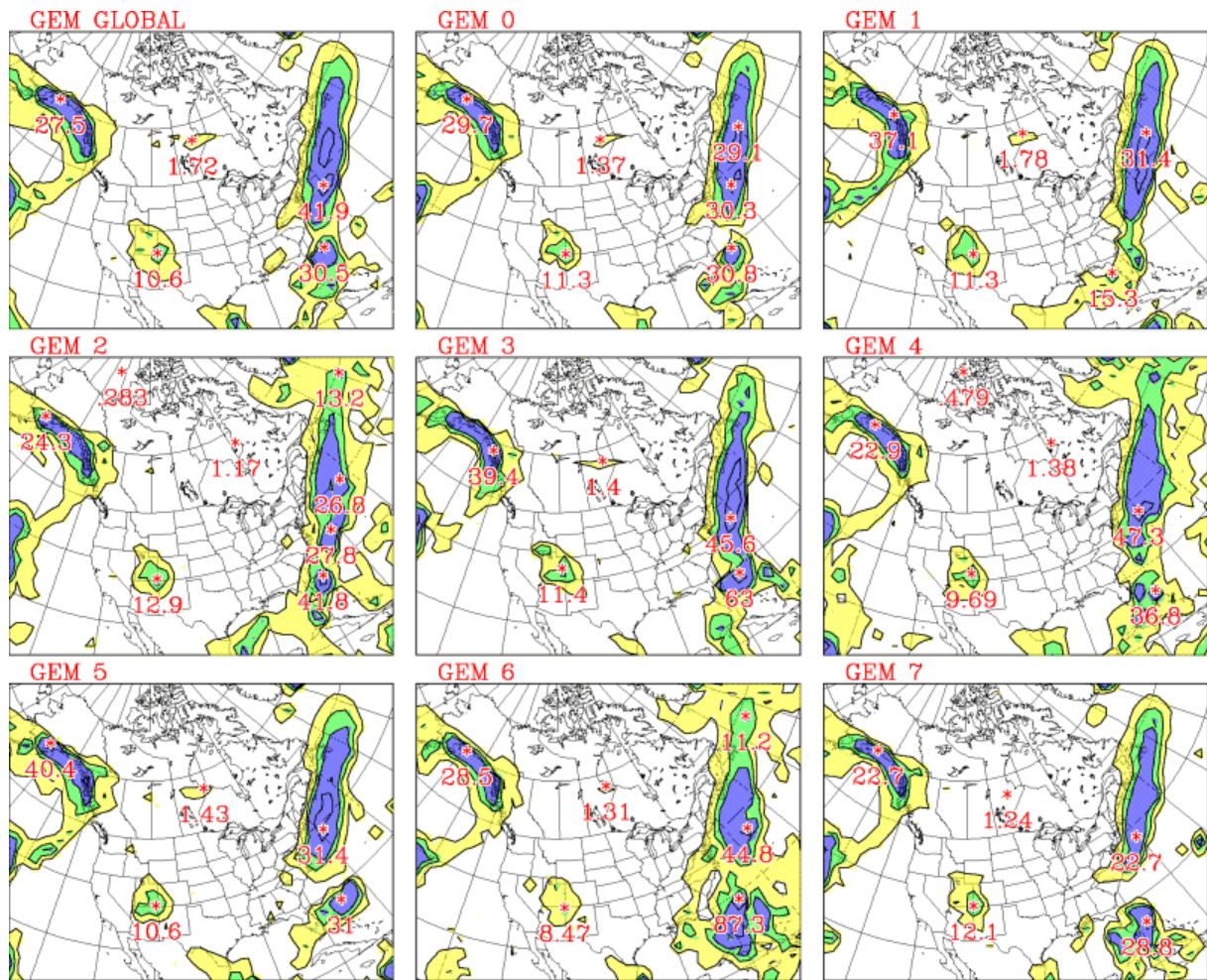


FIGURE 3.3 – Prévision d'ensemble pour la précipitation cumulée pour un horizon de 12h valide le 13 Janvier 2015 à 1200 UTC. Le contrôle et 7 membres sur 20 du MSC sont montrés dans cette figure. (source : <http://weather.gc.ca/>)

3.3 Modèles hydrologiques

Concepts généraux

Les modèles hydrologiques se séparent selon deux critères : la représentation des processus hydrologiques et la représentation spatiale.

Les modèles à base physique sont ceux qui représentent le cycle de l'eau selon les lois qui décrivent les processus tel l'infiltration, l'évapotranspiration et la fonte de la neige.

Les modèles conceptuels sont ceux qui idéalisent les processus physiques sous forme de réservoirs. En fait, dans ces modèles, le cycle de l'eau est représenté comme un transfert entre différents réservoirs représentant chacun un élément du bilan hydrologique. Tel qu'il est vu dans [Sood et Smakhtin \(2014\)](#), plusieurs modèles ont été développés à travers le monde. Pour ce qui est de la représentation spatiale, les modèles hydrologiques peuvent être globaux ou distribués. Les modèles globaux représentent le bassin versant comme une seule entité spatiale homogène, tandis que dans les modèles distribués, l'espace est discrétisé selon un maillage ou en sous-bassins afin de prendre en compte la variabilité spatiale des processus.

Historique

La méthode rationnelle ([Mulvaney, 1851](#)) est la première relation simplifiée qui a été tracée entre la précipitation tombée et le débit maximal modélisé sur un bassin en particulier. Cette méthode est encore utilisée pour la conception des égouts pluviaux ([Lloyd-Davies, Jones, & Travis, 1906](#)) en plus d'être encore inscrite dans le cursus d'hydrologie des étudiants en ingénierie au Canada. Une variante de la méthode permet également de estimer les temps de parcours de l'eau des sous-bassins à l'exutoire en considérant le coefficient de Manning ([Manning, Griffith, Pigot, & Vernon-Harcourt, 1890](#) ; [Gauckler, 1867](#)).

Une autre base des modèles hydrologiques est l'utilisation des hydrogrammes unitaires ([Sherman, 1932](#)). L'hydrogramme unitaire est le premier outil permettant une prévision hydrologique de par sa relation avec les hyétogrammes malgré une hypothèse de linearité et d'invariance du temps. Plusieurs améliorations successives permettant de tenir compte des effets d'emménagement d'eau des bassins versants ainsi que de la réponse du bassin aux intrants ont mené au développement du premier modèle conceptuel, soit le "Nash Cascade" ([Nash et al., 1960](#)). Depuis, les avancées dans la compréhension des processus physiques ont permis de concevoir une panoplie de modèles, qu'ils soient conceptuels, physiques, globaux ou distribués ([Singh & Woolhiser, 2002](#)).

Les modèles conceptuels modernes ont été utilisés avec succès dans de nombreuses expériences. Par exemple, [Perrin, Michel, et Andréassian \(2001\)](#) montrent qu'il n'est pas nécessaire qu'un modèle comporte plusieurs paramètres pour pouvoir bien simuler

le débit. En fait, une complexité excessive est souvent représentative d'une trop grande confiance dans la représentation des phénomènes hydrologiques par le modèle. La sur-paramétrisation peut également amener des problèmes d'équifinalité (Beven & Freer, 2001), soit le fait que plusieurs jeux de paramètres ou états initiaux différents atteignent un même état final. Un exemple très répandu de modèle conceptuel ayant connu du succès est GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003). Ce modèle comporte 4 paramètres, soit : X1 (capacité du réservoir de production en mm), X2 (coefficient d'échanges souterrains en mm), X3 (capacité à un jour du réservoir de routage en mm), X4 (temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 en jours). L'approche des auteurs est intéressante. Ils cherchent le niveau de complexité acceptable dans la structure interne de leur modèle qui serait supportée par les données disponibles.

Étant donné que les processus physiques influençant la réponse hydrologique varient selon l'emplacement géographique du bassin à modéliser (climat différent ainsi que conditions du sol variables), plusieurs pays ont développé leurs propres modèles adaptés à leur terrain. C'est le cas des modèles hydrologiques québécois conçus pour bien répondre dans le traitement des bassins versants nordiques. Outre HSAMI (Bisson & Roberge, 1983), les modèles CEQUEAU (Girard, Charbonneau, & Morin, 1972; Girard, Morin, & Charbonneau, 1973; Morin, Paquet, & Sochanski, 1995), MOHYSE (V. Fortin & Turcotte, 2006) et HYDROTEL (J. Fortin, Moussa, Bocquillon, & Villeneuve, 1995) sont utilisés couramment dans diverses institutions au Québec que ce soit dans un contexte opérationnel ou académique.

Les modèles distribués comportent des difficultés de calibration notables, surtout lorsqu'il n'y a pas assez de données disponibles (Refsgaard, 1997). Cependant, la considération de la variabilité spatiale permet de traiter des problèmes comme ceux de l'agriculture (Jiang, Xu, Huang, Huo, & Huang, 2015), la gestion durable des eaux en milieu urbain (Moors, Grimmond, Veldhuizen, Järvi, & van der Bolt, 2015) ainsi que de la sensibilité de la fonte de neige dans les milieux montagneux (Rasouli, Pomeroy, Janowicz, Carey, & Williams, 2014).

3.4 Prévisions hydrologiques

La prévision hydrologique a depuis longtemps été basée sur la méthodologie déterministe donc un changement de mentalité dans le processus de prévision selon une optique probabiliste est difficile (Demeritt, Nobert, Cloke, & Pappenberger, 2010). Historiquement, les prévisions météorologiques étaient estimées suivant la méthode déterministe malgré les nombreuses sources d'incertitude. Un changement de paradigme s'est opéré dans les années 90, alors que l'incertitude reliée aux conditions initiales a été incorporée dans le processus de prévision météorologique.

Les prévisions hydrologiques sont effectuées en utilisant des prévisions météorologiques de précipitation et de température comme entrées du modèle hydrologique choisi.

Les prévisions hydrologiques déterministes sont ainsi obtenues à l'aide de prévisions météorologiques déterministes. Donc, on ne considère qu'un scénario d'évolution des conditions atmosphériques pour la prévision hydrologique alors que l'approche probabiliste s'efforce à considérer plusieurs scénarios probables. D'autre part, une analyse peut également être effectuée sur l'incertitude sur les paramètres des modèles hydrologiques ou autres éléments représentés dans la figure 2.1 (ex. [Song, Zhan, Kong, & Xia, 2011](#)).

Par exemple, les prévisions hydrologiques produites avec le modèle météorologique canadien comportent 20 membres, soit un pour chacun des 20 scénarios produits par des perturbations dans les conditions initiales.

Il existe également d'autres façons de produire des prévisions d'ensembles comme par exemple avec plusieurs modèles hydrologiques différents ou avec plusieurs entrées météorologiques déterministes provenant de divers centres de prévision.

Les prévisions à moyen terme (de deux à 15 jours à l'avance) sont très utiles pour la prévention d'événements d'importance telles des crues de fréquence peu élevée. Les prévisions probabilistes peuvent signaler au prévisionniste la possibilité d'un événement extrême plusieurs jours à l'avance ([Cloke & Pappenberger, 2009](#)).

Malgré la difficulté des centres météorologiques à prévoir les variables d'importance en hydrologie comme la précipitation, la prévision part du principe qu'il vaut mieux avoir de l'information imparfaite que de rester ignorant sur les aléas futurs. Dans de nombreuses publications, les prévisions probabilistes sont qualifiées comme étant plus complètes que leurs contreparties déterministes étant donné qu'elles considèrent non seulement les événements les plus probables mais également la probabilité de réalisation événements extrêmes et rares ([He et al., 2010](#)). De plus, les prévisions probabilistes montrent plus de cohérence temporelle (L'incertitude des prévisions est proportionnelle à l'horizon de prévision) que les prévisions déterministes et elles servent à déterminer le scénario le plus probable ([Buizza, 2008](#)). [Krzysztofowicz \(2001\)](#) énumère plusieurs raisons pour lesquelles les prévisions probabilistes sont plus justes que les prévisions déterministes.

Ce projet de recherche peut s'inscrire dans l'initiative internationale HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction Experiment) dont le but principal est de rapprocher les communautés scientifiques en météorologie et en hydrologie afin de travailler ensemble pour créer des prévisions de qualité pour leur utilisation en ingénierie et ainsi contribuer à la gestion des ressources hydriques. Les groupes de travail HEPEX ont commencé en 2003. À cette époque, il n'y avait aucun centre qui produisait des prévisions hydrologiques d'ensemble basées sur les prévisions d'ensemble météorologiques. Depuis, le NCEP (États-Unis) et le ECMWF (Europe) produisent des prévisions selon la méthodologie probabiliste ([Schaake & Buizza, 2014](#)).

3.5 Approche multimodèle

Les divers travaux dans le domaine du multi-modèle ont démontré qu'on ne peut pas considérer qu'un seul modèle comme étant le meilleur en tout temps et dans toutes les circonstances ([Oudin, Andréassian, Mathevet, Perrin, & Michel, 2006](#)). L'approche multi-modèle en général suggère que les prévisions faites en considérant simultanément plusieurs modèles hydrologiques ou météorologiques offrent une meilleure performance que chacune de ces prévisions considérées individuellement. Ce concept a soulevé plusieurs questions dans la communauté scientifique (ex. [Heideman, Stewart, Moninger, & Reagan-Cirincione, 1993](#); [Heideman et al., 1993](#); [Peng, Kumar, van den Dool, & Barnston, 2002](#); [Kharin & Zwiers, 2002](#)) :

- Comment un modèle médiocre peut-il apporter une plus value à une prévision ?
- Comment l'approche multi-modèle peut-elle être meilleure que la performance moyenne de chacun des modèles ?
- Pourquoi ne pas utiliser le meilleur modèle individuel à la place de l'approche multi-modèle ?

De plus, il est légitime de se demander si la considération d'autant de scénarios différents amène nécessairement à une prévision plus habile. Cette question amène à sonder les travaux faits dans le domaine de l'aide à la décision ou deux articles retiennent l'attention. Premièrement, considérant des phénomènes complexes [Brânzei, Tijs, et Timmer \(2001\)](#) expriment qu'il est bénéfique de posséder le plus d'information possible pour prendre des décisions dans une situation impliquant plusieurs processus complexes. En contre-partie, cette même abondance d'information n'a pas permis aux météorologues de produire des prévisions plus performantes dans l'expérience de [Heideman et al. \(1993\)](#).

Le concept de combinaison des membres des différents centres météorologiques mondiaux provient du fait que certaines études ont démontré qu'il faudrait avoir plus de 50 membres pour obtenir une représentation adéquate de l'incertitude (ex. [Choi & Beven, 2007](#); [Montanari, 2005](#); [Pappenberger & Beven, 2006](#)).

La combinaison des prévisions de différentes sorties de modèle numériques de prévision météorologique de court à moyen terme pour la prévision hydrologique possède un potentiel intéressant pour représenter l'incertitude reliée à la modélisation. En fait, la plupart des systèmes de prévision d'ensemble sont conçus afin que chacun de leurs membres soit équiprobable et que le nombre de membres représente adéquatement l'incertitude quant à l'état initial de l'atmosphère. Certains systèmes de prévision d'ensemble météorologiques incluent également l'incertitude inhérente aux paramètres et à l'assimilation des données. La citation suivante tirée de [Wagener et Gupta \(2005\)](#) résume bien l'importance de représenter adéquatement l'incertitude (confiance) liée à la prévision hydrologique.

Good modeling practice requires that the forcing data, structural and other uncertainties be propagated into the model predictions and communicated in an appropriate manner to the decision maker or stakeholder, thereby allowing an appropriate degree of confidence to be attributed to the model results.

Finalement, il faut garder à l'esprit que la prévision hydrologique se fait dans un contexte incertain, soit celui du réchauffement de la planète. Ce changement dans le régime atmosphérique fait en sorte que la fréquence des forts débits augmente et qu'il devient beaucoup plus difficile de prévoir le contexte hydrologique à venir car le processus générateur est beaucoup plus aléatoire (ex. Tsonis, 1996, 2004). De plus, faut aussi considérer que les composantes du processus de prévision comme la modélisation simplifiée du système hydrologique jusqu'aux les données recueillies pour valider notre système contiennent elles aussi des incertitudes non-négligeables tel que montré dans la figure 2.1 (ex. Andréassian, Perrin, Michel, Usart-Sanchez, & Lavabre, 2001 ; Melching, 1992).

Dans ce contexte, il va de soi que les gestionnaires des ressources hydriques veulent avoir une approximation correcte de l'incertitude sur laquelle baser les décisions. Parmi les différentes études, les systèmes multi-modèles hydrologiques et multi-modèles atmosphériques sont très populaires et traitent de deux sources d'incertitude auxquelles la prévision de débit est sensible.

3.5.1 Multi-modèle hydrologique

La méthode multi-modèle hydrologique traite la portion de l'incertitude attribuable à la structure des modèles hydrologiques. En fait, chaque modèle hydrologique possède ses particularités physiques et produisent donc des prévisions différentes. De cette façon, les performances de chaque modèle diffèrent entre elles. Ces performances peuvent varier selon le temps de l'année, des conditions météorologiques, etc. En fait, un modèle peut mieux performer lors de la crue, tandis qu'un autre est plus performant lors de l'étiage.

Un article en particulier retient l'attention par rapport à cette avenue dans l'approche multi-modèle, soit Velázquez, Anctil, et Perrin (2010). Les auteurs dressent une revue complète des méthodes de post-traitement multi-modèle récentes ainsi qu'une analyse d'un ensemble formé de 17 modèles hydrologiques conceptuels différents appliqués sur un échantillon de 1061 bassins versants sur le territoire français.

Les auteurs font mention de plusieurs méthodes de post-traitement ou de choix des modèles internes du modèle hydrologique, notamment basées sur le principe de la pondération des modèles selon un critère de performance. Par exemple, Shamseldin, O'Connor, et Liang (1997) traite trois méthodes combinatoires différentes sur des prévisions provenant d'un multi-modèle hydrologique. Ces trois méthodes sont la méthode de la moyenne, la méthode de la moyenne pondérée et les réseaux de neurones. Les auteurs arrivent à la conclusion que l'information combinée des modèles hydrologiques est plus précise que le meilleur modèle individuel. Un autre exemple intéressant d'utilisa-

tion d'un multi-modèle hydrologique a été proposé par [Duan, Ajami, Gao, et Sorooshian \(2007\)](#). Les auteurs analysent un système de trois modèles hydrologiques ainsi que trois fonctions objectives différentes utilisées tout à tour pour la calibration de chaque modèle, créant ainsi 9 membres.

3.5.2 Multi-modèle météorologique

L'incertitude liée aux intrants météorologiques des modèles hydrologiques est rarement prise en compte. En fait, plusieurs modèles météorologiques existent ayant chacun leurs incertitudes liées à leur structure ainsi qu'à la façon dont les membres sont générés. D'où l'intérêt de combiner les prévisions d'ensemble produites par différents centres météorologiques afin d'atteindre la représentation de l'incertitude la plus détaillée possible et des prévisions hydrologiques d'ensemble de meilleure qualité. De plus, il est fort possible que chacun des modèles atmosphériques performe tour à tour mieux que les autres suivant différents contextes hydrologiques. Ainsi, un des modèles pourrait fournir de meilleures informations météorologiques que les autres en contexte crues alors qu'un autre modèle pourrait s'avérer supérieur en contexte d'étiage.

Un exemple intéressant qui a montré l'utilité du multi-modèle météorologique en contexte de prévision saisonnière est sans doute le projet DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction [Palmer et al., 2004](#)). Ce projet est une combinaison de modèles de l'océan et de modèles atmosphériques à l'échelle de la planète. Les résultats montrent que les prévisions sont plus fiables qu'avec un seul modèle mais les auteurs soulignent également que cette approche n'est pas suffisante à elle seule et qu'il faudrait des méthodes de post-traitement pour traiter les problèmes de biais et sous-dispersion de ces prévisions.

Au Québec, l'étude d'un système de prévision hydrologique à multi-modèle météorologique en contexte de prévision hydrologiques a été conduit pour le bassin versant Gatineau. L'utilisation des modèles atmosphériques GEM et SEF d'Environnement-Canada a donné des résultats intéressants, notamment une plus-value sur les prévisions déterministes pour un horizon de prévision dépassant deux jours, entraînant une réduction des déversements non-productifs et une hausse du turbinage ([Boucher, Tremblay, Delorme, Perreault, & Anctil, 2012](#)).

3.6 Qualité des prévisions d'ensemble

Les sorties des systèmes de prévision d'ensemble peuvent être interprétées comme étant des réalisations issus d'un modèle générateur. Si l'on calcule des intervalles de confiance, des probabilités de dépassement de seuil, il faut donc ajuster une loi de probabilité aux réalisations de ce système. Suite à cet ajustement, les prévisions probabilistes prennent la forme d'une fonction de densité de probabilité cumulative comme

montré dans la figure 3.4.

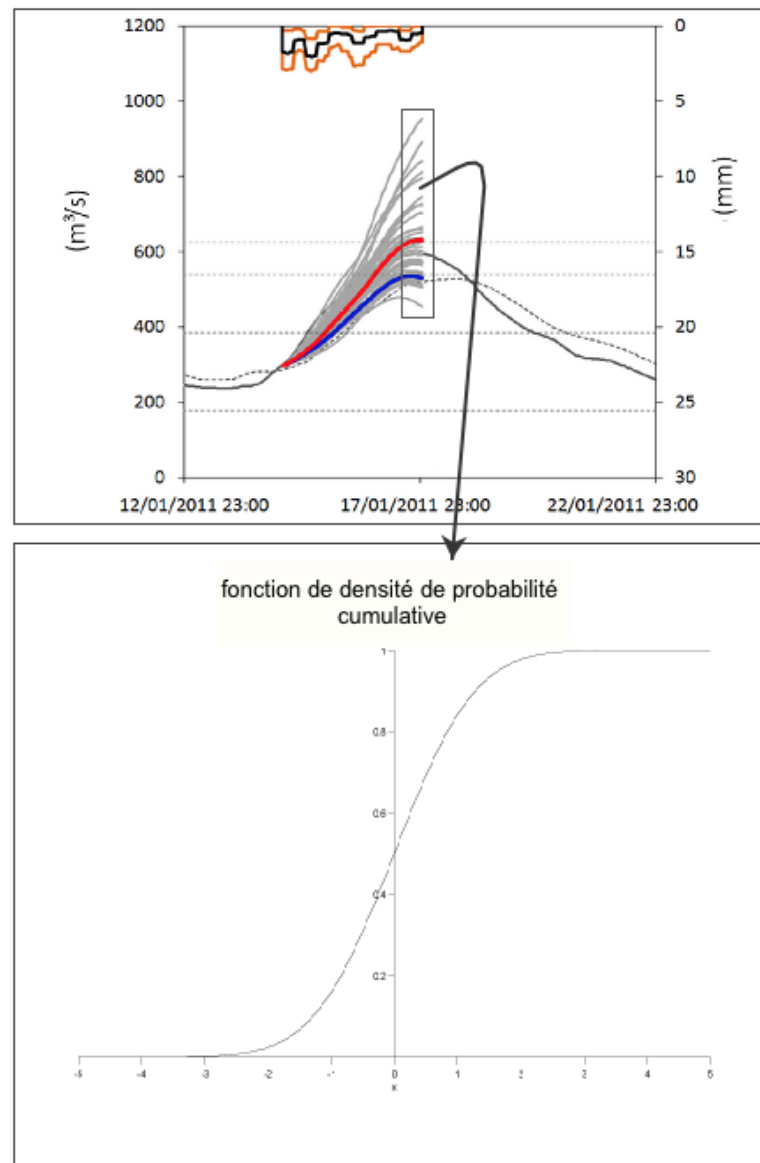


FIGURE 3.4 – Transition de prévisions hydrologiques d'ensemble à fonction de densité de probabilité cumulative pour un horizon donné (adapté de : IPH – UFRGS)

La qualité des prévisions d'ensemble se mesure selon la fiabilité et la résolution. La citation suivante, tirée de [Gneiting, Balabdaoui, et Raftery \(2007\)](#), exprime bien la façon dont les prévisions sont analysées.

Une bonne prévision probabiliste possède une résolution élevée sous contrainte d'être fiable. Ainsi, la fiabilité des prévisions est la qualité à privilégier. Pour deux systèmes de prévisions probabilistes fiables, celui dont la résolution est la plus élevée est considéré

comme supérieur.

La fiabilité se mesure en comparant la densité de probabilité de la prévision probabiliste et l'observation effectuée à l'horizon prévu. Si la densité de probabilité est centrée autour de l'observation et que les intervalles de confiance calculés à partir de la distribution prédictive correspondent à leur définition, ceci veut dire que la prévision est fiable. Cette qualité se mesure sur la base d'un grand échantillon de couples prévision-observation car il faut évaluer la fiabilité dans divers contextes prévisionnels afin que la mesure soit représentative.

La résolution se mesure en observant l'écart de la fonction de densité de probabilité de la prévision autour de l'observation. Plus cet écart est large, plus la résolution est faible. La figure 3.5 montre ces deux qualités sur une fonction de densité de probabilité fictive.

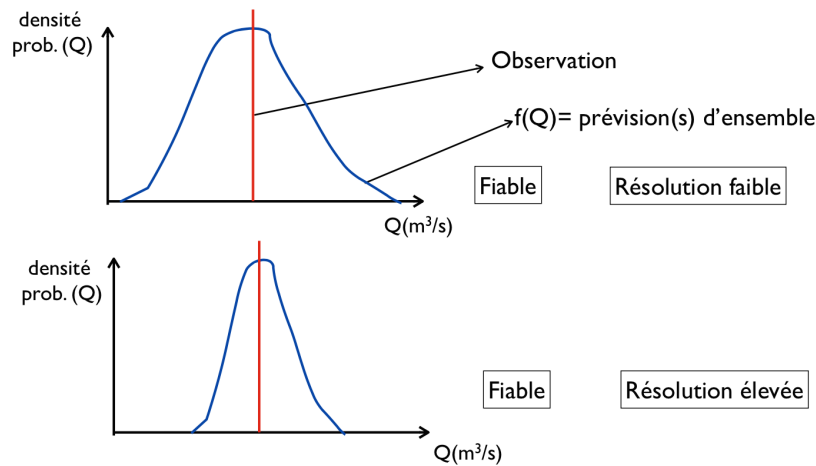


FIGURE 3.5 – Différence entre fiabilité et résolution dans les prévisions hydrologiques d'ensemble (source : notes de cours 6MDI868-Sujets spéciaux en hydrologie)

Les prévisions probabilistes brutes exhibent souvent certains problèmes de biais et de sous-dispersion donc des méthodes de post-traitement ont été proposées afin de corriger ces problèmes tel que montré dans la figure 3.6.

3.7 Méthodes de post-traitement

Des méthodes statistiques ont été mises au point afin de post-traiter les prévisions probabilistes brutes. Ces prévisions démontrent souvent de la sous-dispersion ou des biais et c'est pour corriger cela que ces méthodes ont été conçues. Les méthodes de la famille des noyaux sont particulièrement intéressantes de par leur simplicité. En fait, cette famille de méthodes vise à habiller les membres des prévisions selon une

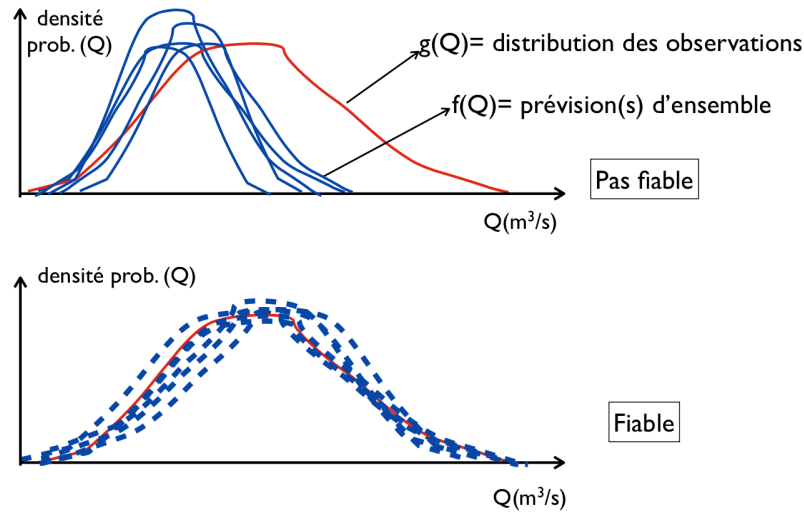


FIGURE 3.6 – Exemple de traitement du biais et de la dispersion sur des prévisions d'ensemble fictives (source : notes de cours 6MDI868-Sujets spéciaux en hydrologie)

largeur de bande qui dépend de la performance des membres à travers une période d'entraînement. Par exemple, la méthode "best member" de [Roulston et Smith \(2003\)](#) consiste à habiller les membres de la prévision brute avec la distribution des erreurs effectuées par le meilleur membre de l'ensemble. Cette méthode de ré-échantillonnage requiert donc des données au préalable pour calculer cette largeur de bande qui servira à habiller les membres. Une variation de cette approche a été effectuée par [Wang et Bishop \(2005\)](#) où la distribution des erreurs est remise à l'échelle afin d'éviter d'avoir des ensembles sous-dispersés ou sur-dispersés. Par la suite [V. Fortin, Favre, et Said \(2006\)](#) ont proposé une amélioration en effectuant un traitement spécifique pour chaque statistique d'ordre. Cette méthode se base sur la méthode de [Wang et Bishop \(2005\)](#) mais elle corrige le comportement de la distribution prédictive dans les extrêmes en utilisant une distribution des erreurs différente pour chaque statistique d'ordre.

La difficulté à calibrer des poids pour une combinaison optimale des prévisions a également fait l'objet de publications (ex. [Kharin & Zwiers, 2002](#); [Peng et al., 2002](#)). Ces questionnements auxquels [Hagedorn, Doblas-Reyes, et Palmer \(2005\)](#) tentent de répondre, sont importants à comprendre pour saisir l'intérêt de l'approche multi-modèle.

Une des difficultés premières du traitement statistique est que la définition même du biais est très complexe ([Boucher, Perreault, Anctil, & Favre, 2015](#)). Comment être certains que l'on enlève un biais ou bien que l'on enlève une information importante de notre prévision? Afin d'avoir une idée des sources d'incertitude et de biais dans le contexte de ce projet, les particularités du projet ainsi que l'approche méthodologique seront exposées dans le chapitre 5.

Chapitre 4

Approche méthodologique

4.1 Considérations générales

La réalisation de ce projet de recherche a nécessité des efforts importants dans l'obtention et la gestion des données météorologiques et hydrologiques. Dans cette section, un bref aperçu des méthodologies de collecte, d'organisation et de traitement des données sera développé.

En premier lieu, les données ont été recueillies sur la base de données TIGGE hébergée par le ECMWF (Europe). Afin d'exploiter les données, il a fallu se doter des outils GRIB API et CDO dans le but de pouvoir agréger et modifier les données météorologiques. Par la suite, la figure 4.1 illustre la séquence d'opérations faite pour produire des prévisions hydrologiques à l'aide du modèle hydrologique HSAMI.

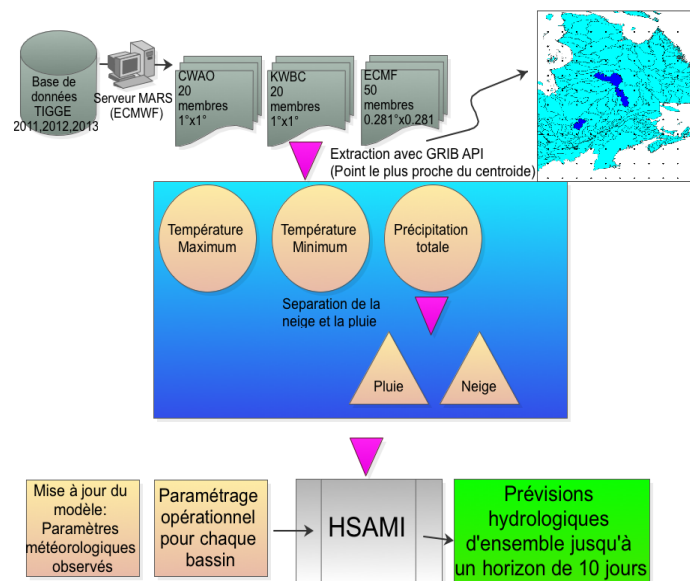


FIGURE 4.1 – Processus de production des prévisions hydrologiques d'ensemble

La séparation des précipitations cumulées se fait par le biais d'un coefficient lorsque la température maximale est supérieure à 0 et que la température minimale est inférieure à 0. Le coefficient dépend de la proportion des températures maximales et minimales par rapport à 0 degrés Celsius. Par exemple si la température minimale prévue est de moins quatre degrés Celsius et que la température maximale prévue est de un degré Celsius. L'écart de température est de cinq degrés. Donc le coefficient pour la séparation de la pluie en neige est de 80 %. Cette séparation n'est pas parfaite car on ne distingue pas entre la neige fondante et la pluie verglaçante entre autres.

4.2 Le modèle hydrologique HSAMI

Le modèle hydrologique choisi pour l'étude est HSAMI ([Bisson & Roberge, 1983](#)), soit le modèle utilisé à l'interne par Hydro-Québec pour faire la prévision hydrologique depuis plus de 20 ans. Il s'agit d'un modèle conceptuel et global développé par Hydro-Québec. Il possède 23 paramètres et est basé sur un concept de réservoirs linéaires modélisant les transmissions physiques de l'eau dans l'environnement tel que représenté dans la figure [4.2](#).

Les paramètres utilisés dans cette étude sont ceux qui sont utilisés dans le domaine opérationnel et ont été fournis par l'IREQ. Ces paramètres ont été calibrés à l'aide d'un critère mono-objectif (Nash-Sutcliffe [Nash & Sutcliffe, 1970](#)) en 2004 sur tout l'historique disponible pour chaque bassin. Pour les jeux de paramètres obtenus, les prévisionnistes ont vérifié que certains critères étaient respectés tels le pourcentage du débit de base sur le débit total, etc. Il convient de souligner que les paramètres utilisés sont ceux qui sont utilisés à l'opérationnel par l'équipe de prévision d'Hydro-Québec Production.

De plus, il existe une autre limitation dans le projet au niveau des variables d'état. Dans un contexte opérationnel, la mise-à-jour du modèle se fait manuellement. La mise-à-jour consiste à réviser systématiquement l'état initial du bassin (teneur en eau du sol, équivalent en eau de la neige, etc.) avant de lancer une nouvelle prévision. Dans le cas de la prévision opérationnelle chez Hydro-Québec, les prévisionnistes modifient indirectement les variables d'état du modèle en modifiant légèrement les observations météorologiques récentes. Un facteur additif est utilisé pour la température et un facteur multiplicatif pour la précipitation. Dans le cadre du présent projet, il n'était pas envisageable de tenter de répliquer cette méthode sur trois ans. Il n'était pas non plus réaliste d'ajouter la mise en place d'un système d'assimilation de données sophistiqué aux objectifs déjà importants du projet. Ainsi, les observations hydro-météorologiques n'ont pas été assimilées. Par conséquent, il a été jugé acceptable de donner les observations météorologiques comme intrants préalables à la prévision. En théorie, si l'on donne les observations à un modèle hydrologique bien calibré, alors on est en mesure de s'attendre à avoir une simulation qui s'apparente aux débits observés. En pratique,

ce n'est pas toujours ce qui se produit à cause l'incertitude sur les prévisions météo, l'état initial du bassin et modèle hydrologique lui-même. Malgré cette limitation, les prévisions Ces limitations désavantagent grandement les prévisions hydrologiques d'ensemble, mais tel qu'il sera vu dans les chapitres subséquents, malgré ceci, les prévisions de débit produites dans le cadre de ce mémoire montrent une habileté de prévision à moyen-terme.

À l'opérationnel, les intrants du modèle HSAMI varient selon l'horizon de prévision. Pour une prévision à court-terme (1 à 4 jours), les prévisions météorologiques déterministes d'Environnement Canada sont forcées dans le modèle hydrologique. Pour ce qui est de la prévision à moyen-long terme (5 à 200 jours), ce sont les années de l'historique météorologique qui jouent le rôle d'intrants.

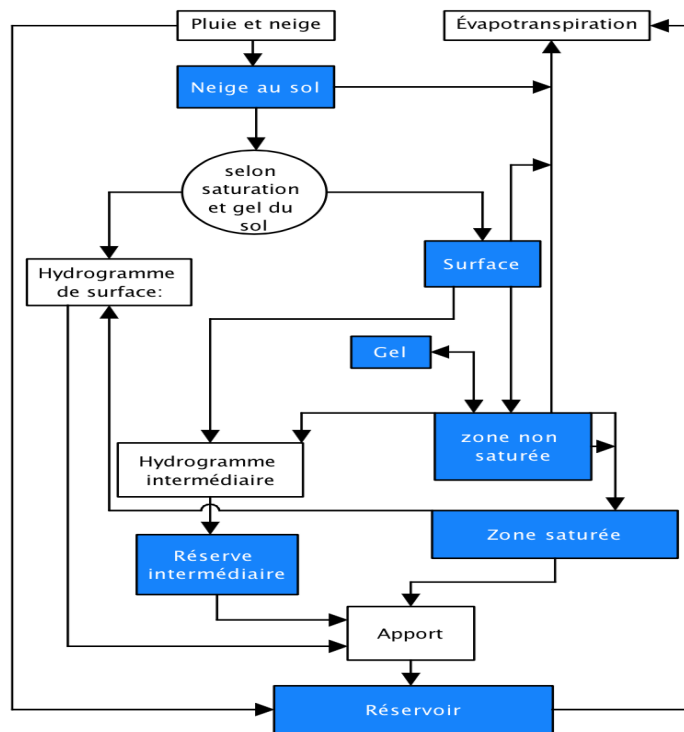


FIGURE 4.2 – Schéma du fonctionnement du modèle hydrologique HSAMI (Fortin, 2000)

4.3 Prévisions météorologiques

Il va de soi que la prévision hydrologique comporte plusieurs sources d'incertitude. Parmi ces sources d'incertitude, les intrants météorologiques sont considérés comme étant très importants (ex. [Cloke & Pappenberger, 2009](#)). De plus, les prévisions de précipitations sont déterminantes quant au débit modélisé et ce sont celles qui sont les plus difficiles à gérer étant donné leur variabilité spatiale importante. Dans cette optique, les

grilles des prévisions météorologiques ont été extraites en gardant la résolution spatiale des fichiers d'origine dans la base de données TIGGE. Une liste exhaustive des centres disponibles dans cette base de données est contenue dans le tableau 4.3. Les résolutions dans ce tableau sont celles qui sont émises à l'origine par chaque centre. Toutefois, les fichiers disponibles pour le téléchargement ont des résolutions différentes. Le tableau 4.1 montre les résolutions des grilles de prévision utilisées dans le cadre de ce projet de maîtrise :

TABLEAU 4.1: Prévisions météorologiques utilisées dans le projet

Centres Météorologiques	Pays	Résolution
Meteorological Service of Canada (MSC)	Canada	1°x 1°
NCEP	États-Unis	0.281° x 0.281°
European Centre from Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)	Europe	1° x 1°

Les prévisions météorologiques sont disponibles par horizon de 6 heures. Étant donné que le projet traite les prévisions journalières, il a fallu combiner les données afin d'avoir des prévisions sur 24 heures. Dans d'autres mots, une prévision journalière comporte 4 plages de prévision de 6 heures. Par exemple, en ce qui concerne les précipitations cumulées, il a fallu faire la différence entre la valeur de précipitation tombée à l'horizon 24 heures avec celle tombée à la première plage de prévision. De manière similaire, en ce qui concerne la températures maximale, il a fallu trouver le maximum parmi les 4 plages de prévision contenues dans une journée. Cet exercice a été fait en tenant compte du décalage horaire car les prévisions météorologiques d'ensemble ont été émises à 1200 UTC.

Il existe plusieurs méthodes de mise à l'échelle des données en grille. Certaines sont plus compliquées que d'autres. L'extraction en grille des données de prévision a été faite afin de tester ces méthodes postérieurement. Le sujet de l'évaluation des données météorologiques sur un bassin versant peut représenter un projet en lui-même. Par conséquent, l'extraction des valeurs pour les trois bassins versants s'est fait d'une manière simple dans ce projet. En fait, le point de grille le plus proche du centroïde (voir tableau 4.2) de la superficie du bassin versant a été extrait pour les variables de précipitation totale, température maximale et température minimale. Toutefois, il faut tenir en compte que les modèles hydrologiques globaux malgré qu'ils traitent un bassin versant comme étant une entité homogène, ne sont pas limités à être utilisés sur des petits bassins (Merz, Parajka, & Blöschl, 2009).

TABLEAU 4.2: Coordonnées en latitude et longitude des centroïdes des bassins versants

Bassins Versants	Latitude(°)	Longitude(°)
LA GRANDE 4	53.3676	-71.6706
OUTARDES 4	50.9844	-69.7033
BASKATONG	47.3539	-75.4184

L'initiative TIGGE met l'archive des prévisions météorologiques des principaux centres mondiaux à la disposition de la communauté scientifique. Chacun des centres possède sa propre structure interne ainsi que sa propre méthode de perturbation des membres de prévision. De plus, il y a des différences au niveau de la résolution spatiale,

de l'horizon de prévision, du nombre de membres et du nombre d'émission de prévisions par jour.

4.3.1 Meteorological Service of Canada (MSC)

Le Centre Météorologique Canadien (MSC : Meteorological Service of Canada) produit des prévisions déterministes et probabilistes pour l'ensemble de la planète. Parmi les produits issus du centre météorologique canadien, on compte les prévisions déterministes et probabilistes d'ensemble.

Les prévisions d'ensemble utilisées dans le cadre de ce projet comportent les 20 membres initialement perturbés du modèle canadien GEM (Côté et al., 1998). La caractéristique particulière de ces membres est qu'ils ont des paramétrisations physiques différentes (Monte Carlo-like perturbed-observation approach Gneiting & Raftery, 2005), des cycles d'assimilation de données différents et des séries d'observations perturbées différentes également (Houtekamer, Lefaiivre, Derome, Ritchie, & Mitchell, 1996).

Depuis juillet 2007, le modèle probabiliste comporte 20 membres qui se rendent jusqu'à un horizon de prévision de 16 jours. Il convient également de souligner la participation du Centre Canadien à la North American Ensemble Forecast System (NAEFS) qui contient également des membres issus du NWS (National Weather Service) aux États-Unis et du NMSM (National Meteorological Service of Mexico).

Les prévisions d'ensemble canadiennes sont émises deux fois par jour et jusqu'à 16 jours dans le futur. La résolution de base de la grille est de 0.6 degrés, cependant les prévisions disponibles dans la base de données TIGGE ainsi que dans NAEFS est de 1 x 1 degrés (environ 100 km) jusqu'à un horizon de 15 jours (voir 4.1).

Les prévisions météorologiques canadiennes sont disponibles sur TIGGE depuis le 3 octobre 2007. Depuis 2011, il y a eu trois améliorations dans le modèle météorologique, la dernière datant du 13 février 2013. Les changements majeurs étant la version du modèle GEM 4.4.1. et l'assimilation des données par filtre de Kalman d'ensemble.

4.3.2 Centre Météorologique Américain (NCEP)

Le modèle atmosphérique américain (GEFS : Global Ensemble Forecast System) est composé de 20 membres plus un membre contrôle tout comme le modèle canadien. Chacun des membres provient d'une perturbation spécifique du modèle.

La méthode de perturbation utilisée est celle des erreurs croissantes (Gneiting & Raftery, 2005).

La prévision se fait également par tranche de 6 heures et ce jusqu'à un horizon de 15 jours avec une résolution de 0.9 x 0.9 degrés.

Les prévisions d'ensemble du NCEP sont disponibles sur TIGGE depuis le 27 mars 2007.

4.3.3 European Center of Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)

La méthodologie de perturbation des membres adoptée par l'ECMWF (Europe) est le "bred-vector perturbation method" (Toth & Kalnay, 1993). Le ECMWF est composé de 50 membres plus le membre contrôle. L'horizon de prévision pour les prévisions probabilistes se rend jusqu'à 15 jours. Le ECMWF est le centre qui possède la résolution spatiale la plus fine, soit 0.281×0.281 degrés.

Les prévisions d'ensemble du ECMWF sont disponibles sur TIGGE depuis le 1 octobre 2006.

4.4 Mesure de la performance des prévisions

La vérification de la qualité des prévisions doit être effectuée pour plusieurs raisons soit administratives, scientifiques et économiques. La performance des prévisions hydrologiques peut être décomposée en différents attributs. Ces attributs sont la fiabilité, la résolution et la discrimination (*sharpness*). Par conséquent, il existe plusieurs méthodologies pour quantifier chacun de ces attributs.

Les mesures de performance se séparent donc en deux catégories : déterministes et probabilistes. Dans ce projet de maîtrise, des scores de performance déterministes et probabilistes seront appliqués pour évaluer la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble.

En premier lieu, il convient d'expliquer quels sont les attributs d'une prévision hydrologique performante. On qualifie des prévisions comme étant informatives quand elles servent de support au gestionnaire afin de faire des décisions éclairées à l'égard de l'incertitude liée aux phénomènes hydrologiques.

Les scores pour mesurer la qualité d'une prévision se doivent d'être justes, c'est-à-dire qu'ils se doivent d'encourager le prévisionniste à émettre sa véritable croyance de manière honnête (Gneiting & Raftery, 2007). Un score juste fait que la distribution prédictive la plus semblable à la "vraie" loi génératrice d'observations est celle qui obtient la plus grande gratification.

La citation suivante provenant d'un rapport de l'IREQ (Perrault, Décembre 2013) résume bien le processus d'évaluation pratiqué opérationnellement :

" Le cadre théorique adopté est celui proposé récemment par Gneiting et al. (2007), qui suppose que le système de prévision probabiliste vise à estimer au mieux le processus générateur d'observations. Plus précisément, selon leur définition, un système de prévision est dit performant s'il fournit en tout temps des distributions prédictives qui maximisent la précision tout en étant bien calibrées. La précision réfère à la concentration de la densité de probabilité prédictive autour d'une valeur centrale. Elle traduit

donc le degré d'incertitude associée à la prévision. La calibration d'un système de prévision probabiliste réfère plutôt à la cohérence entre les distributions prédictives qu'il produit et les données observées correspondantes."

4.4.1 Le Continuous Ranked Probability Score (CRPS)

Un des scores pour prévisions probabilistes les plus utilisés tant en sciences atmosphériques qu'en hydrologie est le "Continuous Ranked Probability Score" (CRPS [Matheson & Winkler, 1976](#)). Par définition, Le CRPS est l'erreur au carré de la fonction de densité cumulative de la prévision d'ensemble par rapport à l'observation. Le calcul du CRPS est illustré à la figure 4.3 et son expression mathématique est donné par l'équation 4.1.

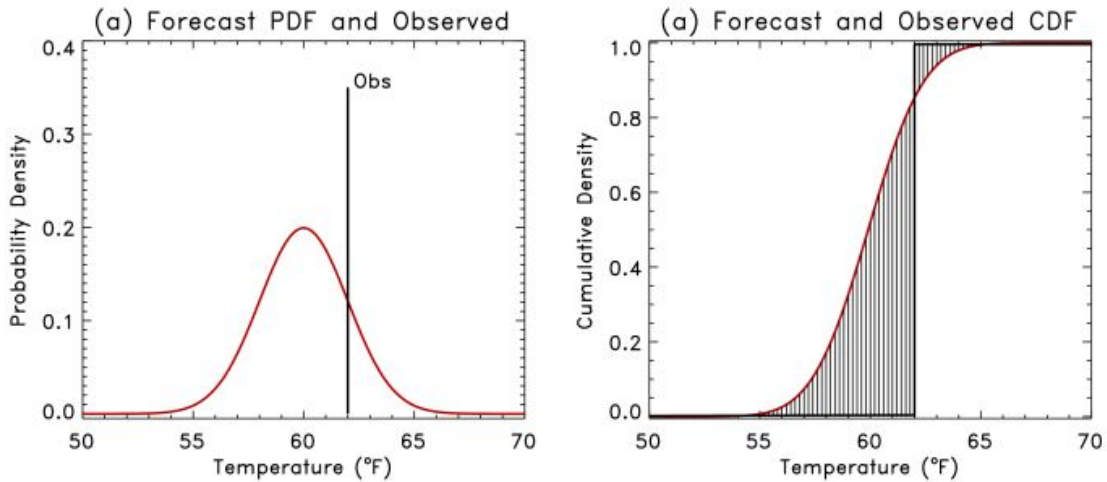


FIGURE 4.3 – Exemple de calcul du CRPS sur la température (Tiré de : EUMETCAL)

$$\text{CRPS} = \int_{-\infty}^{\infty} [F_y(y) - 1(y \geq x)]^2 dy \quad (4.1)$$

Où F_y est la fonction de répartition de la distribution prédictive et x est l'observation de la variable y à prévoir. 1 est la fonction identité, qui est égale à 0 pour toutes les valeurs y de débit inférieures à l'observation x et égale à 1 pour les $y \geq x$.

Il existe une solution analytique pour l'équation 4.1 pour des distributions normales ([Gneiting & Raftery, 2007](#)), cependant très rarement les prévisions de débit à court terme sont modélisées adéquatement par cette loi. Il existe deux options pour pallier à ce manque, soit une approximation de la valeur du CRPS par la méthode de Monte Carlo ([Székely & Rizzo, 2005](#); [Gneiting & Raftery, 2007](#)) ou un calcul basé sur la distribution empirique calculée en ordonnant les membres de l'ensemble ([Hersbach, 2000](#)) aussi appelée décomposition de Hersbach. C'est cette variante du CRPS qui sera

utilisée dans le projet parce qu'elle peut être décomposée en un terme pour la résolution et un terme pour la fiabilité.

Une des propriétés intéressantes du CRPS est qu'il est directement comparable avec l'erreur moyenne absolue. Ceci permet la comparaison directe des prévisions d'ensemble avec des prévisions déterministes ([Gneiting & Raftery, 2007](#)).

Ce score est orienté négativement, c'est-à-dire que plus sa valeur est petite, plus la prévision est précise. De plus, le CRPS a de la valeur lorsque calculé sur un grand nombre de prévisions et observations correspondantes car c'est une mesure qui compare deux valeurs intrinsèquement différentes. Le fait que l'on compare un scalaire avec une fonction de densité de probabilité nécessite qu'on puisse couvrir toute la plage de probabilités afin de pouvoir bien évaluer la performance du système.

4.4.2 Histogramme de rang

L'histogramme de rang, aussi appelé diagramme de Talagrand, est une représentation visuelle de la dispersion des membres d'une prévision probabiliste ([Talagrand, Vautard, & Strauss, 1997](#) ; [Hamill & Colucci, 1997](#)). Cet histogramme donne une idée de la dispersion des prévisions d'ensemble, c'est-à-dire si la dispersion des membres est vraiment représentative de l'incertitude de la prévision. La calibration des prévisions probabilistes est la cohérence statistique entre la distribution prédictive et les observations.

L'hypothèse derrière l'histogramme de rang est que dans un système de prévision probabiliste idéal, l'observation a des chances équivalents de se trouver dans n'importe quel rang si l'ensemble est bien calibré.

La construction de l'histogramme de rang se fait comme suit :

- Arrangement par ordre croissant de l'ensemble des prévisions ayant n membres et l'observation correspondante.
- Noter le rang correspondant à l'observation.
- Répéter avec toutes les paires observation-prévision disponibles.
- Tracer l'histogramme correspondant à la fréquence des observations contenues par rang de prévision.

L'interprétation de l'histogramme de rang se fait selon sa forme finale. Si l'histogramme de rang est uniforme (plat) alors la variance de l'ensemble représente bien toutes les sources de l'erreur. Si la forme finale est concave alors les sources d'erreur sont sous-estimées on dit alors que l'ensemble de prévisions est sous-dispersé. Si la forme finale est convexe, alors les sources d'erreur sont surestimées car les rangs extrêmes de l'ensemble ne contiennent pas d'observation. Si certains rangs intermédiaires ont une fréquence anormalement élevée, alors il y a un biais dans la prévision. Toutes ces situations sont illustrées à la figure [4.4](#).

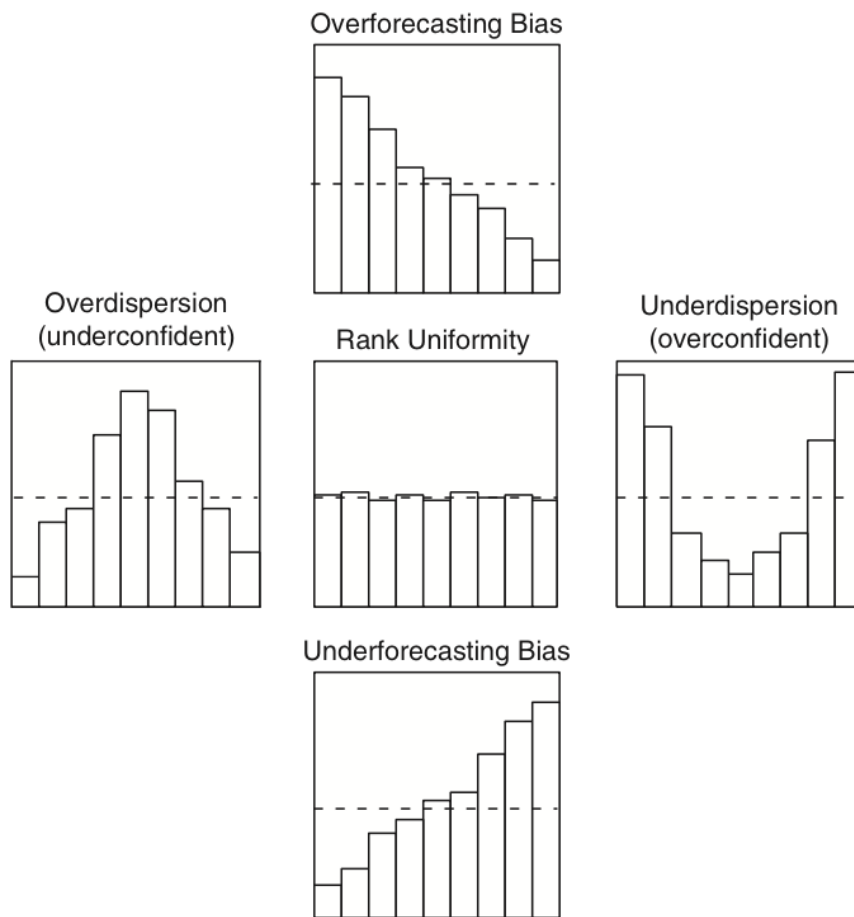


FIGURE 4.4 – Interprétation de l’histogramme de rang (tiré de Wilks, 2011)

Cependant, le diagramme de rang a certaines limitations ([Hamill, 2001](#)), car une prévision non corrigée peut également donner un diagramme plat. C’est pour cela qu’il faut utiliser l’histogramme de rang en conjonction avec des indicateurs tels le CRPS ou le diagramme de fiabilité (ex. [Wilks, 2011](#) ; [Hamill, 1997](#)).

4.4.3 Erreur absolue moyenne

L’erreur absolue moyenne (MAE : Mean Absolute Error) sert à mesurer à quel point la prévision est proche de l’observation. Ce score sert à poser un jugement sur la qualité des prévisions déterministes. le MAE est donné par l’équation [4.2](#).

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (4.2)$$

Où e est l’écart entre l’observation et la prévision, n est le nombre de paires prévision-observation dans la base de données à analyser. Étant donné que seuls les quantiles des séries-mères étaient disponibles pour ce projet, alors leur qualité a été déterminée en utilisant le MAE. Une autre caractéristique intéressante est le fait qu’il soit possible de comparer directement les valeurs du CRPS au MAE ([Gneiting & Raftery, 2007](#)).

D’autres scores existent comme la racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error). Cependant, étant donné que le terme de l’erreur est au carré, les écarts aux pointes sont plus pénalisés. L’équation [4.3](#) permet de calculer le RMSE.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (4.3)$$

4.5 Pré-traitement et post-traitement

Les prévisions météorologiques sont souvent sous-dispersées malgré les améliorations des modèles lors des dernières années. Ainsi, il est parfois souhaitable d’appliquer un post-traitement statistique pour corriger un biais systématique ou bien des problèmes de sous-dispersion. Toutefois, la pertinence du pré-traitement des prévisions météorologiques pour la prévision hydrologique reste un sujet débattu dans la communauté scientifique. En fait, certains travaux semblent indiquer que le pré-traitement n’a pas eu l’effet escompté pour les prévisions hydrologiques, tandis que d’autres prouvent le contraire (ex. [Kang, Kim, & Hong, 2010](#)). De plus, l’estimation du biais sur les prévisions est difficile parce que les modèles atmosphériques changent rapidement et il n’est pas souvent possible de disposer d’une ré-analyse pour pouvoir détecter les erreurs systématiques.

Dans ce projet de maîtrise, une approche simple a été adoptée pour traiter les membres de la prévision d'ensemble météorologique. Les membres aberrants ont ainsi été éliminés. De plus, le BMA a été appliqué suivant certaines simplifications afin de faciliter la convergence des ajustements.

4.5.1 Pré-traitement

Tel qu'il sera vu dans le chapitre 5, certains membres issus des centres météorologiques donnent des précipitations qui sont aberrantes c'est-à-dire beaucoup trop élevés par rapport aux observations. Dans un premier temps, le BMA a été appliqué en intégrant ces membres dans la prévision probabiliste. Par la suite, le BMA a été appliqué suivant la suppression de ces membres qui ont été enlevés après une évaluation visuelle des prévisions de débit et de précipitation. Cette procédure est semblable au traitement faits par les prévisionnistes en contexte opérationnel.

D'ailleurs, il convient de mentionner que l'application du BMA nécessite que les membres suivent un traitement du biais avant d'être pondérés. Ce traitement se fait différemment selon la loi de probabilité choisie pour l'ajustement. Ces méthodes seront explicitées dans la sous-section suivante.

4.5.2 Bayesian Model Averaging (BMA)

Le Bayesian Model Averaging (BMA) est une méthode de post-traitement pour des prévisions probabilistes introduite par [Gneiting et Raftery \(2005\)](#). Cette méthode consiste à améliorer la résolution et à réduire le biais des prévisions probabilistes de variables continues telles la température et la précipitation.

Cette méthodologie de combinaison multi-modèle a été utilisée avec succès en prévision hydrologique ([Duan et al., 2007](#)), en hydrogéologie ([Neuman, 2003](#)), en hydraulique ([Wöhling & Vrugt, 2008](#)), ainsi que sur des prévisions de vitesse et direction du vent ([Sloughter, Gneiting, & Raftery, 2010](#)) entre autres.

Le BMA met l'emphasis sur la pondération de chacun des modèles selon leur performance, changeant ainsi l'approche de trouver le meilleur modèle possible. En fait, conditionner la méthode de post-traitement à trouver le "meilleur" modèle serait équivalent à sous-estimer l'incertitude ([Raftery, Gneiting, Balabdaoui, & Polakowski, 2005](#)).

Le BMA résulte en un mélange de lois. Ce dernier est obtenu en combinant des fonctions de densité de probabilité centrées sur chacun membres dont on a enlevé le biais et qu'on a pondéré préalablement. Cette technique comporte certaines difficultés, notamment un grand nombre de paramètres à estimer. Par conséquent, certaines hypothèses telles l'interchangeabilité des membres provenant d'un même modèle doivent être posées afin de pouvoir arriver à réduire le nombre de paramètres libres ([Fraley, Raftery, & Gneiting, 2010](#)). Cette hypothèse est sujet à discussion, surtout pour les membres issus d'un ensemble multi-physique comme le canadien. Toutefois, cette hypothèse est

nécessaire pour produire une distribution de probabilité post-traitée qui ne soit pas sur-ajustée (Wilson, Beauregard, Raftery, & Verret, 2007).

Une des principales difficultés de l'application de cette méthode est la détermination des paramètres attribués au modèle statistique retenu. Les deux modèles statistiques testés dans le cadre de ce projet sont les distributions normale et gamma.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les paramètres des lois de probabilité dont la méthode des moments. Cependant, cette méthode peut causer des erreurs qui peuvent induire à faire des inférences ou des estimations inadéquates (Wilks, 2011). La méthode du maximum de vraisemblance est la plus répandue pour le calcul des paramètres des modèles à combiner.

Il a été expliqué au Chapitre 3 que d'après plusieurs auteurs, les prévisions d'ensemble possèdent une plus-value considérable. Le BMA met en compétition divers modèle de prévisions d'ensemble afin d'améliorer les prévisions. Ce concept est analogue à ce que les prévisionnistes font lorsqu'ils placent plus de confiance dans un membre en particulier. Toutefois, le BMA fait ceci en accordant un poids moyen calculé avec les probabilités à posteriori des modèles qui génèrent les prévisions sur une période d'entraînement définie. C'est-à-dire que les pondérations accordées par le BMA reflètent la performance d'un modèle donné puisqu'ils sont une mesure de la vraisemblance probabiliste que celui-ci soit correct par rapport à une période d'entraînement (Duan et al., 2007).

Un autre avantage important du BMA est qu'il fournit directement une fonction de densité de probabilité prédictive comme résultat plutôt que laisser au soin de l'utilisateur de l'ajuster lui-même aux membres de l'ensemble. Ceci permet de calculer des probabilités de dépassement d'événements météorologiques ou hydrologiques prédéfinis. De plus, il a été démontré que lorsque seuls les membres de la prévision d'ensemble sont fournies à l'utilisateur, celui-ci a le réflexe d'estimer lui-même des probabilités d'une façon intuitive, en se basant sur son expérience passée. Cette façon de faire serait moins exacte que lorsqu'une loi est ajustée à l'ensemble de manière formelle (Houdant, 2004).

Le schéma général selon lequel le BMA est estimé est illustré par Gneiting et Raftery (2005). La terminologie adoptée est celle de Duan et al. (2007). Considérons y comme étant la valeur à prédire, $D = [y_1^{obs}, y_2^{obs}, \dots, y_t^{obs}]$ comme étant les données d'entraînement sur T jours et $f = [f_1, f_2, \dots, f_k]$ l'ensemble de prévisions de k modèles différents. $p_k(y|f_k, D)$ est la distribution à posteriori de la variable à prévoir y sachant la prévision du modèle f_k et la série d'observations D . Par la loi de de la probabilité totale, la fonction de densité de probabilité de la prévision probabiliste de y peut être représentée par l'équation 4.4.

$$p(y|D) = \sum_{k=1}^K p(f_k|D)p_k(y|f_k) \quad (4.4)$$

où $p(f_k|D)$ est la probabilité à posteriori que la prévision du modèle f_k , aussi connue

comme la vraisemblance du modèle f_k , soit correcte sachant la série d'observations D . C'est ce terme qui confère la pondération à chacun des modèles dont est conçue la prévision probabiliste f . Alors, le poids w_k est déterminé comme étant $w_k = p(f_k, D)$. Par définition, chacun des poids est positif et $\sum_{k=1}^K w_k = 1$.

Les paramètres de la distribution prédictive BMA sont définies comme étant les équations 4.5 et 4.6.

$$E[y|D] = \sum_{k=1}^K p(f_k|D)E[p_k(y|f_k, D)] = \sum_{k=1}^K w_k f_k \quad (4.5)$$

$$\text{Var}[y|D] = \sum_{k=1}^K w_k (f_k - \sum_{i=1}^K w_i f_i)^2 + \sum_{k=1}^K w_k \sigma_k^2 \quad (4.6)$$

ou σ_k^2 est la variance associée aux prévisions du modèle f_k par rapport à la série d'observations D . La variance représentée par l'équation 4.6 peut-être décomposée en deux composantes, soit la variance entre les modèles et intra-modèle. Ceci est une mesure de l'incertitude beaucoup plus éloquente que celle représentée par l'écart entre les membres des différents modèles, c'est-à-dire juste l'incertitude entre les modèles.

Les hypothèses d'ajustement par loi normale ou loi gamma se font sur la distribution de probabilité conditionnelle $p_k(y|f_k, D)$. Afin de calculer $p_k(y|f_k, D)$, il faut procéder par la maximisation de la log-vraisemblance. C'est à cette étape que l'ajustement de la loi normale et la loi gamma diffèrent. De plus, une méthode de traitement du biais doit être pratiquée sur les membres et cette étape est également un peu différente pour les deux lois. L'équation 4.7 est la forme générale pour la log-vraisemblance.

$$l(\theta) = \log\left(\sum_{k=1}^K w_k p(y|f_k, D)\right) \quad (4.7)$$

où θ est le groupe de paramètres de la loi d'ajustement et les poids attribués à chaque modèle. Afin de trouver ces paramètres il faut arriver à maximiser ainsi qu'à faire converger la log-vraisemblance selon une tolérance donnée. Le calcul de la log-vraisemblance se fait à travers l'algorithme EM (Expectation-Maximization) (Dempster, Laird, & Rubin, 1977).

Finalement, le package R *ensembleBMA* (Fraley, Raftery, Gneiting, & Sloughter, 2007) a été utilisé dans le cadre de ce mémoire de maîtrise pour effectuer les ajustements.

Normal

Des recherches ont déjà été entreprises pour ajuster le BMA aux prévisions probabilistes de température issues du Centre Météorologique Canadien (Wilson et al., 2007). Pour ce qui est du débit, il faut effectuer une conversion au préalable afin que l'hypothèse d'une loi normale soit acceptable car la distribution des prévisions de débit est

asymétrique, c'est-à-dire que les valeurs faibles sont plus fréquentes que les valeurs élevées. La conversion qui a été effectuée lors de ce projet de maîtrise est la NQT (Normal Quantile Transformation) ([Bogner, Pappenberger, & Cloke, 2012](#)).

Cette méthode a été appliquée à la distribution prédictive des prévisions d'ensemble afin de la convertir dans l'espace normal. Cette méthode a été utilisée conjointement à d'autres méthodes de post-traitement des prévisions hydrologiques, notamment HUP (Hydrologic Uncertainty Processor ([Krzysztofowicz, 1999](#))) et MCP (Model Conditional Processor ([Todini, 2008](#))). Par exemple, le NQT est utilisé afin de rendre gaussiennes les observations passées et les prévisions correspondantes nécessaires à l'ajustement de la fonction de probabilité conjointe qui servira à corriger le biais sur les prévisions d'ensemble actuelles pour le centre météorologique américain ([Schaafe et al., 2007](#)). D'autre part, le NQT est utilisé aussi dans des méthodes statistiques afin de créer des prévisions probabilistes avec des prévisions déterministes ([Wu et al., 2011](#)). Le NQT empirique ([Krzysztofowicz, 1997](#)) a été appliquée sur les séries temporelles de chaque membre et de l'observation correspondante.

La fonction de répartition des prévisions hydrologiques a été approximée en calculant la position des quantiles selon la loi de Weibull afin de calculer le quantile normal standard correspondant. Les étapes nécessaires à l'application du NQT sont explicitées dans le code R donné dans le rapport technique de [Bogner et al. \(2012\)](#).

La première étape consiste à la génération des statistiques d'ordre d'après la distribution de Weibull qui se fait avec l'équation 4.8.

$$1-F(x) = \frac{(i - a)}{(n + 1 - 2 * a)} \quad (4.8)$$

Où i est le rang de la donnée, a est le paramètre de forme et n est le nombre total de valeurs à l'étude. Le paramètre de forme a peut prendre plusieurs valeurs comme 0.40 pour la formule de Cunnane (Approximation du quantile non-biaisée), 0.375 pour Blom (optimale pour la loi normale). Le paramètre de forme prend la valeur de 0 pour Weibull. Cette formule a été choisie parce qu'elle permet d'estimer une fonction de répartition non-biaisée à partir de toutes les distributions possibles. Il a été rapporté que les prévisions hydrologiques peuvent parfois être multi-modales ([Perrault, Décembre 2013](#)) donc il est préférable d'adopter une approche qui soit le plus flexible possible dans la normalisation des prévisions. Les valeurs résultantes sont incluses entre $[0,1]$ pour les positions de Weibull.

Par la suite, les probabilités sont données en entrée à la fonction de répartition inverse de la loi normale. Cette fonction retourne les valeurs de débits normalisées d'après les probabilités fournies en entrée.

La troisième étape consiste à ordonner les débits du plus petit au plus grand afin de les faire coïncider avec les probabilités calculées auparavant.

Finalement, l'interpolation linéaire entre les valeurs de la fonction de densité cumulative et les valeurs de débit ordonnée est calculée. C'est cette relation qui permettra

par la suite de transformer les débits prévus et observés dans l'espace normal. Si les valeurs de débit à transformer sont à l'extérieur de l'intervalle de valeurs à modéliser, alors les valeurs aux extrêmes sont considérées.

Il faut garder les paramètres de l'interpolation afin de pouvoir faire la transformation inverse.

Pour ce qui est des paramètres de la loi ainsi que des pondérations de différents modèles, ils sont estimés en maximisant la log-vraisemblance. Le groupe de paramètres à estimer est $\theta = [w_k, \sigma_k, k, 1, 2, \dots, K]$. L'autre paramètre de la loi normale à définir est μ tel qu'il est vu dans l'équation 4.9.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (4.9)$$

La moyenne μ est définie après le débiaisage de chacun des membres. En fait, le package R offre un débiaisage de l'ensemble en faisant une régression linéaire entre les observations et les prévisions pour une fenêtre d'entraînement donnée. C'est donc μ qui est définie de cette façon. Ceci a pour conséquence de simplifier le calcul pour la loi normale. Ce n'est pas le cas de la loi gamma, qui a un paramètre de plus à ajuster.

Il faut comprendre que le concept derrière le BMA est d'habiller la prévision d'ensemble selon une loi donnée et ensuite la pondérer par rapport aux autres modèles pour ensuite créer une somme de lois de probabilité tel que présenté à l'équation 4.4. Ce type de BMA a été utilisé avec succès pour prévoir la température tel qu'il est vu à la figure 4.5.

Dans la figure 4.5, 5 modèles différents ont été pondérés et sommés afin de créer la fonction de densité de probabilité de la BMA qui a une forme multimodale.

Gamma

Le BMA a déjà été testé sur des prévisions de débit (ex. [Duan et al., 2007](#)). Par contre, ces prévisions ont été transformées dans la plupart des cas, afin de les rendre normales. Or, les prévisions de débit à court-terme sont souvent asymétriques, ce qui fait que la loi gamma peut être un bon choix. La distribution gamma est caractérisée par sa grande flexibilité donc aucune transformation n'est requise. Cette distribution peut prendre diverses formes asymétriques qui sont semblables à la forme de plusieurs distributions de variables atmosphériques (ex. [Wilks, 2011](#); [Sloughter et al., 2010](#)). Étant donné sa flexibilité et son adaptabilité à modéliser des phénomènes naturels extrêmes, la famille de la loi gamma a déjà été ajustée avec succès à des prévisions hydrologiques d'ensemble ([Alfieri, Thielen, & Pappenberger, 2012](#)).

Tel qu'il peut être vu à l'équation 4.10, la loi gamma a deux paramètres, soit le paramètre de forme α ainsi que le paramètre d'échelle β .

$$g(y) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-y/\beta) \quad (4.10)$$

Pour l'estimation des paramètres, le package *ensembleBMA* exploite les relations suivantes entre α et β et les paramètres de la loi normale μ et σ .

L'équation 4.10 en termes de prévision du modèle k devient l'équation 4.11.

$$g(y|f_k) = \frac{1}{\beta_k^\alpha \Gamma(\alpha_k)} y^{\alpha-1} \exp(-y/\beta_k) \quad (4.11)$$

Les paramètres de la loi gamma dépendent du modèle f_k à travers les relations suivantes,

$$\mu_k = b_{0_k} + b_{1_k} f_k \quad (4.12)$$

$$\sigma_k = c_{0_k} + c_{1_k} f_k \quad (4.13)$$

où $\mu_k = \alpha_k \beta_k$ est la moyenne de la distribution et $\sigma_k = \sqrt{\alpha_k} \beta_k$ est l'écart-type. Afin de réduire le nombre de paramètres à ajuster, l'hypothèse d'un écart-type constant à travers les membres de l'ensemble est retenue. Dans ce cas, c_{0_k} et c_{1_k} deviennent donc c_0 et c_1 .

En premier lieu, les biais des membres des prévisions d'ensemble doivent être corrigés avant l'ajustement de la loi gamma. Les paramètres b_0 et b_1 sont calculées par régression linéaire. Il faut savoir que ces paramètres sont propres à chaque membre en utilisant le

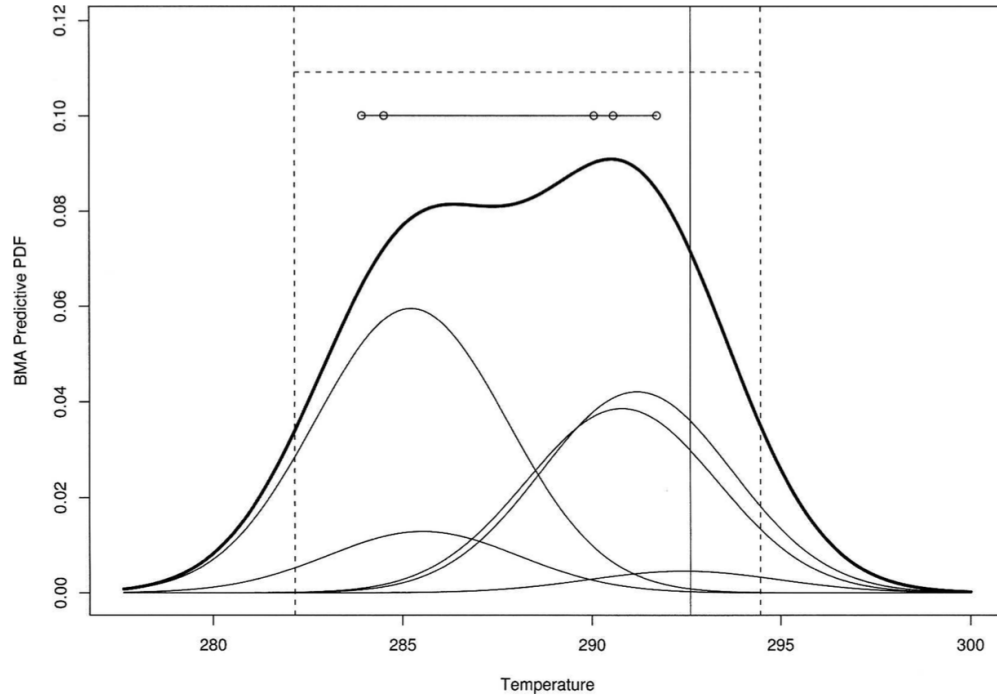


FIGURE 4.5 – Représentation de la fonction de densité de probabilité de la BMA (Tiré de Raftery et al., 2005)

débit observé comme variable dépendante et la prévision hydrologique comme variable indépendante. Les paramètres $w_1, \dots, w_k, c_0, c_1$ sont estimés par maximum de vraisemblance.

Il faut poser l'hypothèse de l'indépendance des erreurs de prévision dans l'espace et le temps afin d'utiliser la formulation suivante du maximum de vraisemblance :

$$l(\theta = [w_1, \dots, w_K; c_0; c_1]) = \sum \log p(y_{st}, \dots, |f_{Kst}) \quad (4.14)$$

Étant donné que c'est la distribution de la prévision de débit issue d'un modèle conceptuel qui est post-traitée, cette hypothèse a été considérée comme étant acceptable. Ceci n'aurait pas été le cas avec un cas multi-varié comme le traitement de variables comme la prévision de température et de précipitation.

Le maximum de vraisemblance est calculé sur toute la plage d'entraînement. Les débits prévus n'atteignent jamais zéro, autrement il aurait fallu créer une exception pour la paramétrisation de la loi gamma. Le maximum de vraisemblance ne peut être calculé analytiquement, il faut recourir à un processus numérique. Ce processus est le l'algorithme EM (Expectation-Maximization) qui sert également à ajuster le BMA pour la loi normale.

Il faut noter que la loi gamma a nécessité une diminution dans la tolérance par rapport à l'ajustement pour la loi normale afin de converger.

Chapitre 5

Résultats

Deux analyses seront effectuées, soit celle de la performance des prévisions météorologiques ainsi que celle des prévisions hydrologiques. L'analyse comportera une comparaison des performances des intrants météorologiques de différents centres ainsi qu'une comparaison des prévisions de débit à partir des prévisions météo d'ensemble avec les quantiles des séries-mères.

Les prévisions hydrologiques d'ensemble se séparent en deux catégories, soit les prévisions hydrologiques brutes et les prévisions hydrologiques avec débiaisage.

5.1 Prévisions météorologiques

Afin de produire les prévisions hydrologiques il a fallu utiliser quatre variables météorologiques comme intrants du modèle HSAMI. Cette section se veut une évaluation des prévisions météorologiques probabilistes brutes par des scores probabilistes. Le but est de voir s'il y a une correspondance entre les performances en prévisions météorologiques probabilistes et les prévisions hydrologiques correspondantes. Dans cette partie, les intrants météorologiques probabilistes des différents centres météorologiques seront comparés à travers le Continuous Ranked Probability Score (CRPS) calculé sur l'ensemble des trois années à l'étude, et ce pour chaque bassin.

5.1.1 Baskatong

La figure 5.1 montre qu'après l'horizon 3 jours, les prévisions de précipitation produites par le ECMWF (Europe), le MSC (Canada) et NCEP(États-Unis) sont comparables en termes de CRPS. Cependant, la décomposition du CRPS laisse entrevoir que la résolution des prévisions de précipitation produites par le centre américain NCEP est meilleure que la résolution des prévisions des deux autres centres, et ce à toute échéance.

Pour ce qui est des CRPS calculés pour la neige, leur évolution est très similaire à ce qui a été observé pour la pluie. Les prévisions d'ensemble américaines offrent une plus value en termes de CRPS calculé à partir du troisième jour. Au niveau de la fiabilité,

le centre canadien est quasi identique au centre européen.

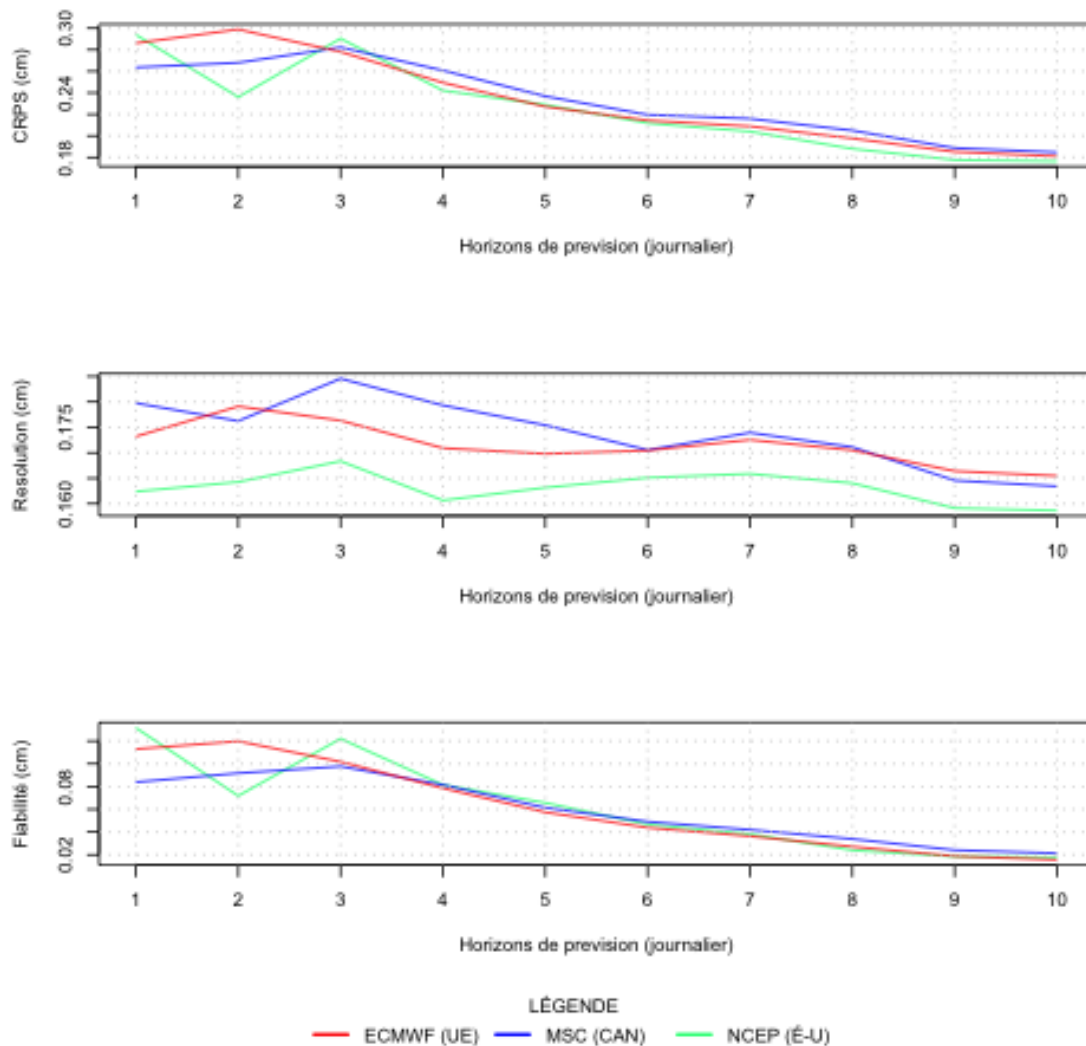


FIGURE 5.1 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie de Baskatong

Pour ce qui est de la prévision des températures maximale, le CRPS atteint un maximum à un horizon de 4 jours pour ensuite décroître doucement jusqu'au jour 10 tel qu'il peut-être vu à la figure 5.2. D'autre part, les prévisions issues du modèle canadien sont clairement meilleures (presque 0.5°C sur le CRPS total) que celles des deux autres centres, et ce à toute échéance.

Finalement, il est intéressant de remarquer le comportement du CRPS associé aux prévisions de températures minimales produites par la composante de résolution du centre canadien pour les prévisions de température minimale de la figure 5.3. Le centre canadien est celui qui performe le mieux à courte échéance. Cependant, la qualité des

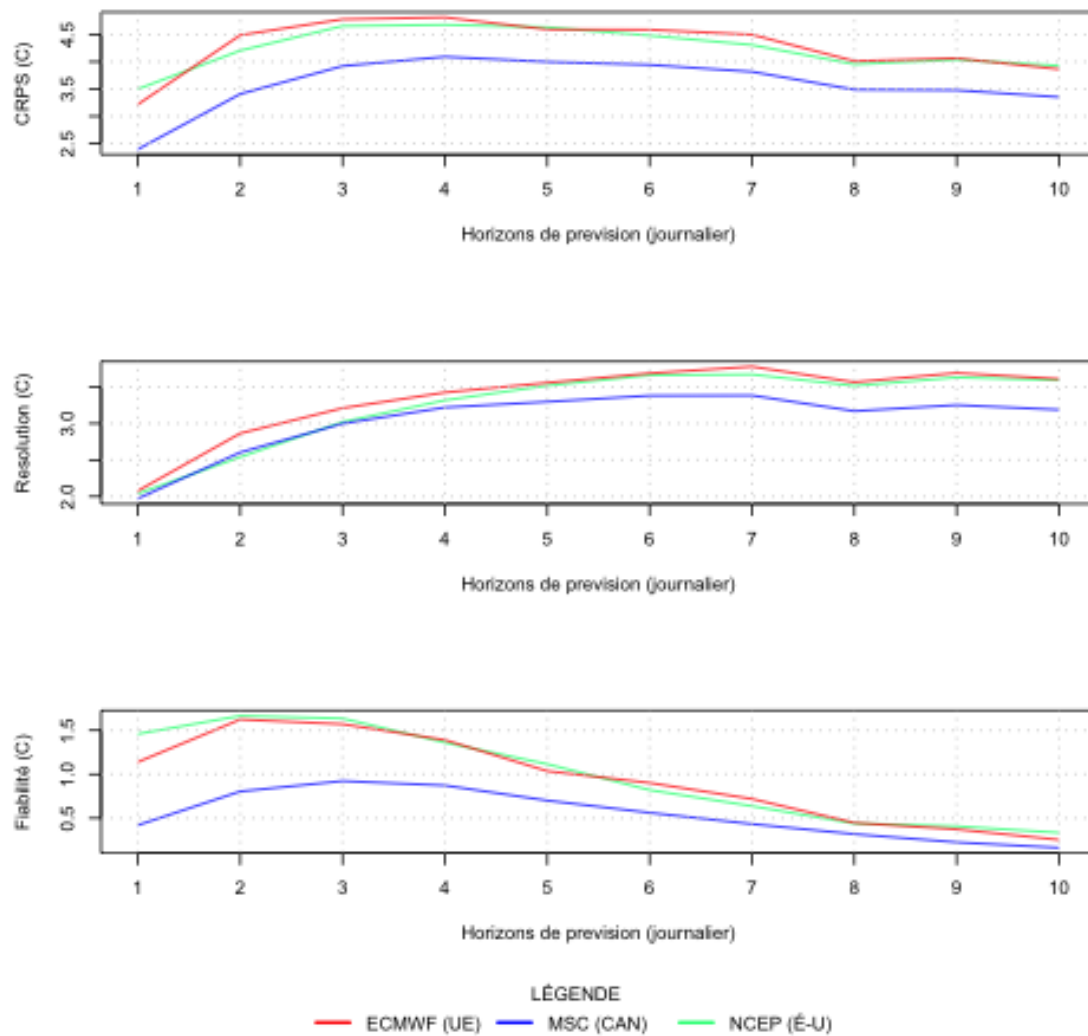


FIGURE 5.2 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale sur Baskatong

prévisions a tendance à se détériorer linéairement à mesure que l'horizon de prévision augmente. Malgré que la prévision canadienne soit semblable à celle des deux autres centres, sa fiabilité est clairement moindre à partir du troisième jour de prévision, d'où l'écart important. Il est intéressant de souligner que l'ordre de performance des centres de prévision est inversé par rapport aux prévisions de température maximale. Ainsi, les prévisions canadiennes offrent le meilleur (plus bas) CRPS pour la température maximale, mais le moins bon pour les prévisions de températures minimales (à partir du jour 4).

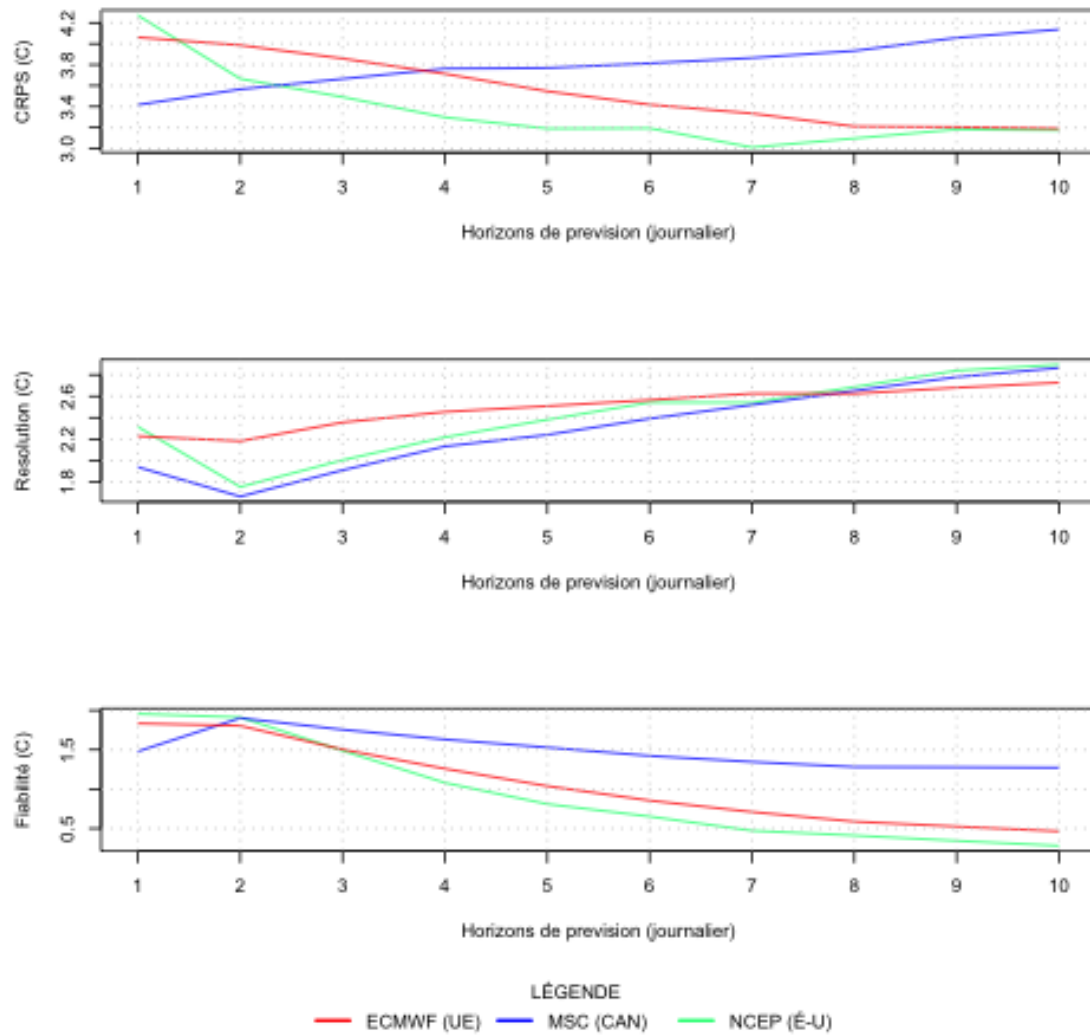


FIGURE 5.3 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale sur Baskatong

5.1.2 La Grande 4

La figure 5.4 présente l'évolution du CRPS total en fonction de l'horizon de prévision pour le bassin La Grande 4, de même que la décomposition du CRPS en résolution et en fiabilité. Si on constate les mêmes tendances générales que pour Baskatong, on remarque par contre que le centre américain NCEP est moins bon (CRPS plus élevé) que les autres. Ceci n'était pas le cas pour Baskatong.

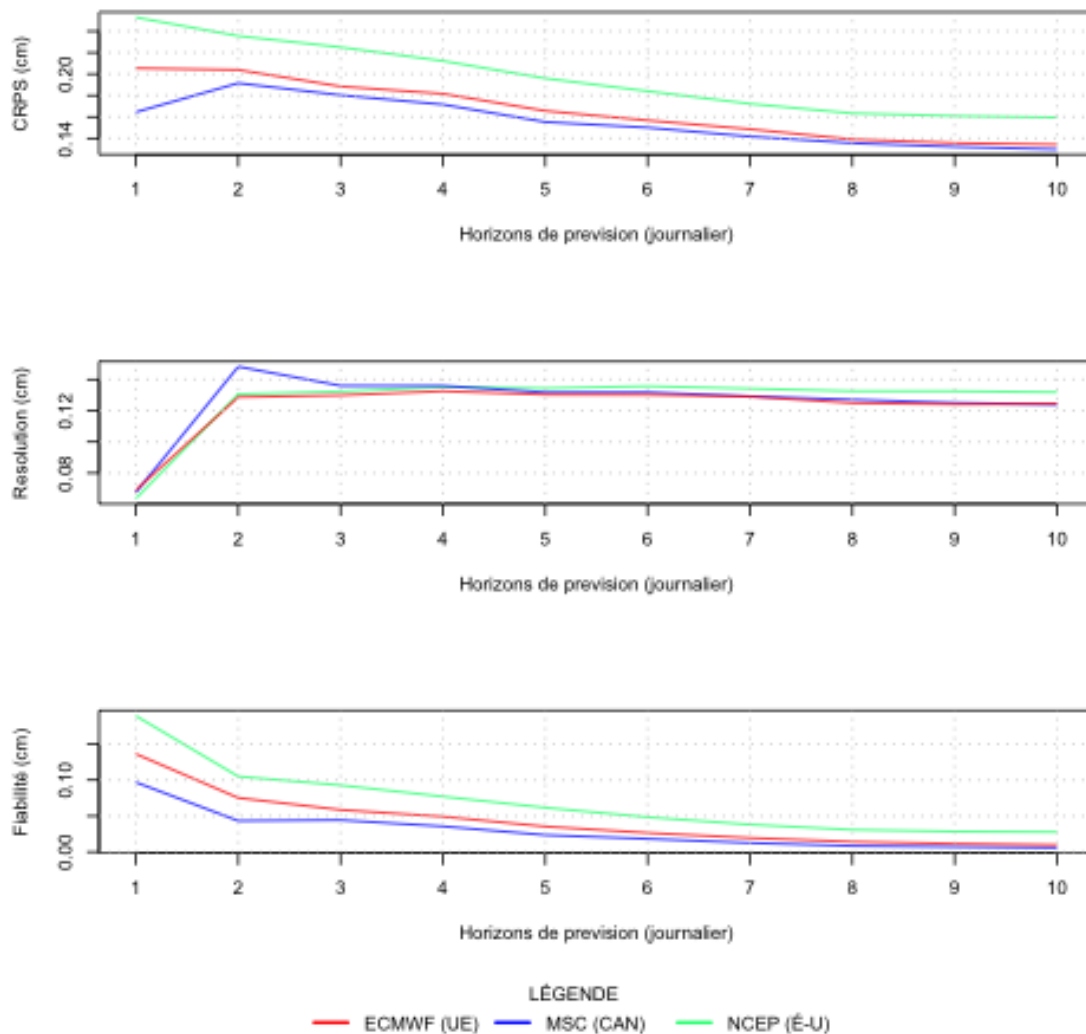


FIGURE 5.4 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie de La Grande 4

La figure 5.5 présente la performance des centres météorologiques sur la prévision de la neige au bassin de la Grande 4. Les prévisions issues du MSC (Canada) se démarquent clairement du lot à cause de leur fiabilité à toutes les échéances de prévision.

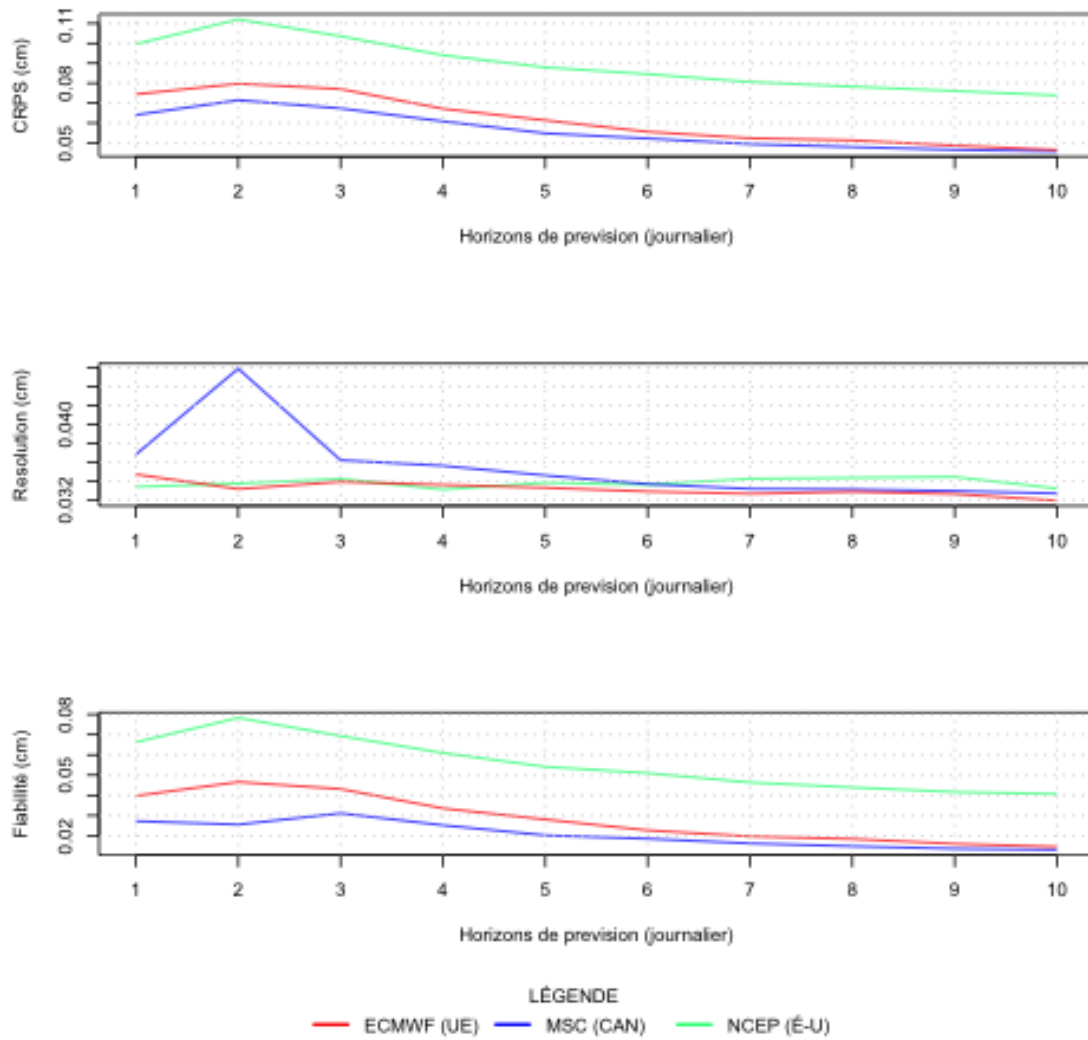


FIGURE 5.5 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige de La Grande 4

Les figures 5.6 et 5.7 présentent quant à elles l'évolution du CRPS en termes de températures maximales et minimales. Il est intéressant de remarquer que les prévisions de température maximale et minimale sont cohérentes car ce sont les prévisions canadiennes qui sont les plus performantes dans le cas (T_{min} et T_{max}), hormis Baskatong.

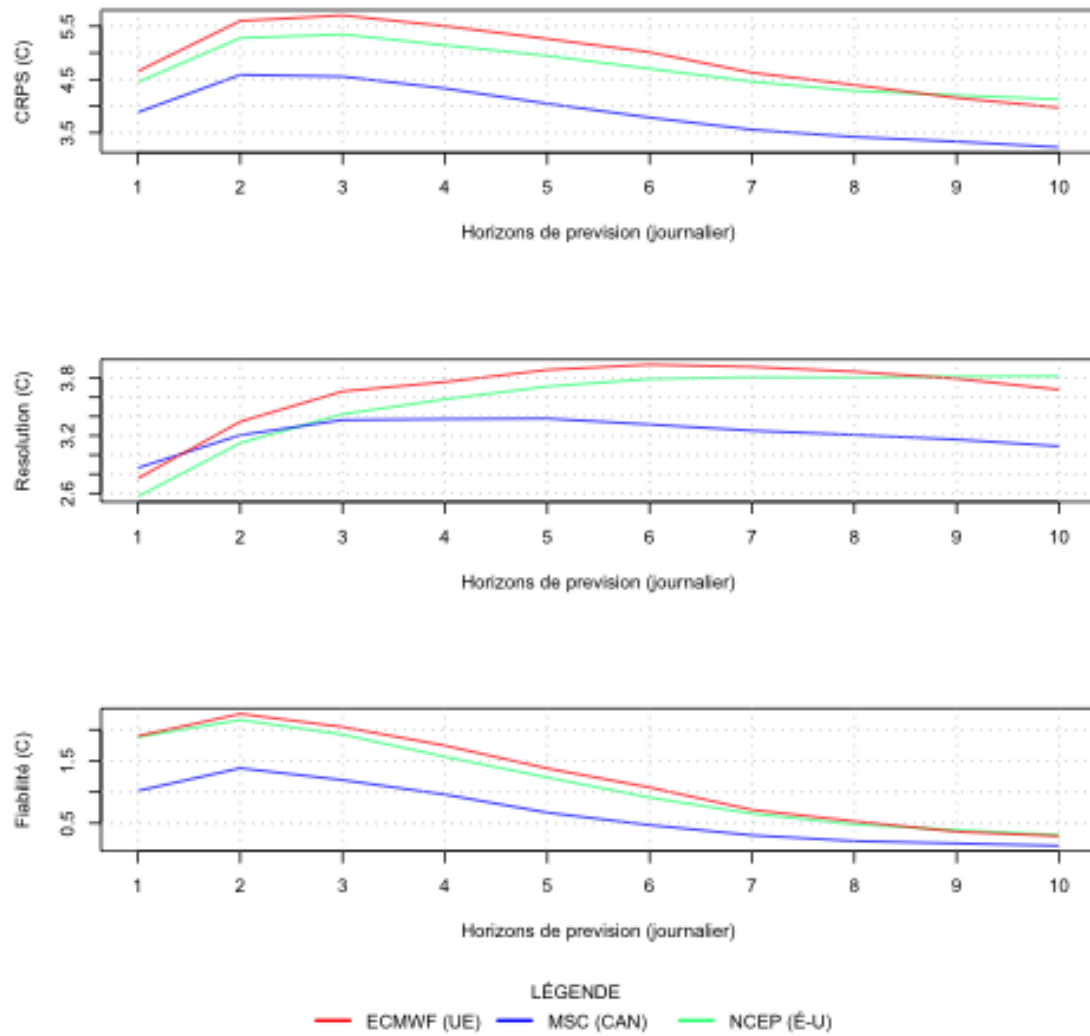


FIGURE 5.6 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale sur La Grande 4

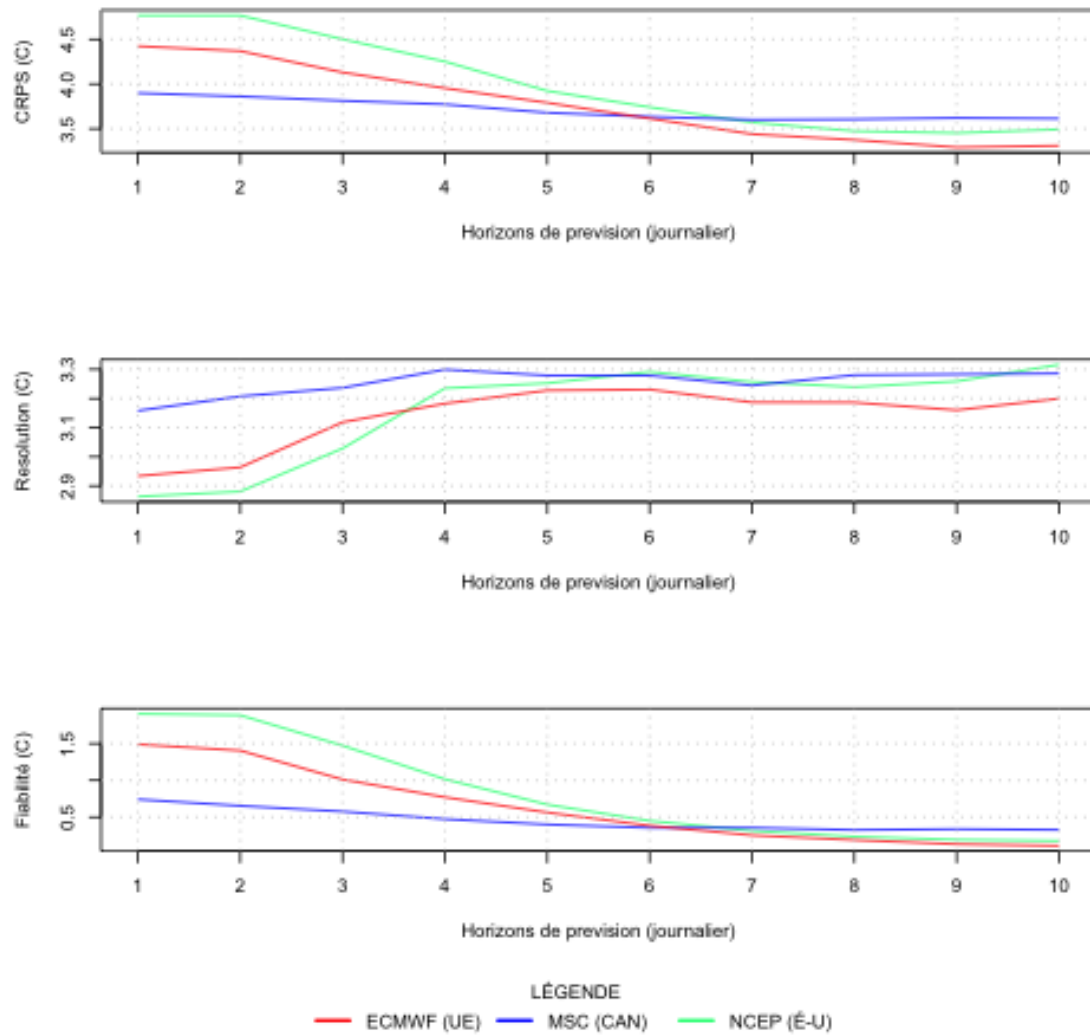


FIGURE 5.7 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale sur La Grande 4

5.1.3 Outardes 4

La figure 5.8 présente encore une fois l'évolution de la performance des prévisions de précipitation avec l'horizon, cette fois pour le bassin Outardes-4. On remarque que le centre ECMWF obtient le CRPS le plus bas à cause de sa résolution car les trois centres ont sensiblement la même fiabilité. L'évolution du CRPS pour les prévisions de neige ont exactement le même comportement donc il n'a pas été jugé nécessaire de les illustrer ici.

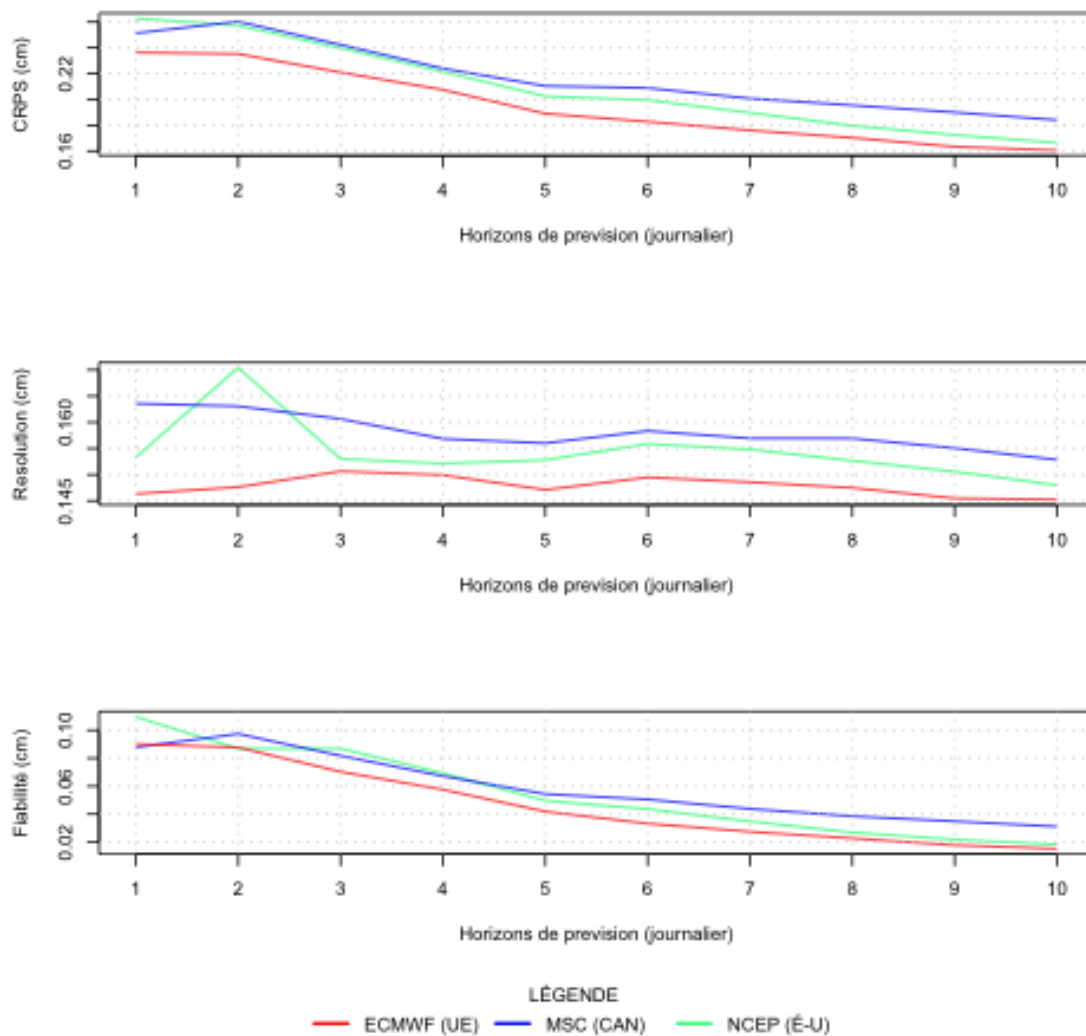


FIGURE 5.8 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de pluie pour Outardes 4

Le CRPS pour les prévisions de température maximale et minimale de Outardes 4 sont semblables à celles de La Grande-4, c'est pourquoi ils ne sont pas illustrés ici. Les

figures peuvent être consultées à l'annexe A.

Il faut souligner que les prévisions canadiennes ont été les meilleures pour les trois bassins en termes de température maximale, variable importante pour déterminer la crue printanière

5.2 Prévisions hydrologiques brutes et post-traitées

En premier lieu, des hydrogrammes de type "spaghetti" sont illustrés pour voir l'évolution des membres des prévisions hydrologiques par rapport à l'échéance de prévision. Les prévisions hydrologiques des trois centres ont été tracées ensemble, en utilisant des couleurs différentes. Tel qu'il sera vu, des membres aberrants issus de prévisions météorologiques sur-estimées vont être mis en évidence. Par la suite, la performance des prévisions hydrologiques brutes a été évaluée à l'aide du CRPS et des histogrammes de rang. Les prévisions d'ensemble des différents centres ont été analysées séparément selon les sigles suivants : MSC (Canada), NCEP (États-Unis) et ECMWF (Union Européenne). De plus, dans la suite du texte, l'ensemble formé en regroupant tous les membres produits par les trois centres est appelée GE (Grand Ensemble). Seul le post-traitement par BMA de type gamma a été appliqué aux prévisions hydrologiques brutes car l'ajustement par loi normale n'a pas été possible. D'autre part, la seule fenêtre mobile d'entraînement qui a convergé à tous les horizons était celle de 60 jours.

L'analyse se fera en cinq temps pour ce qui est des prévisions brutes et débiaisées (sous-section 5.3).

- Les graphiques "spaghetti" des prévisions probabilistes de débit comparées avec les apports filtrés (observations de débit expertisées par les prévisionnistes d'Hydro-Québec) par horizon de prévision.
- Les graphiques "spaghetti" des prévisions post-traitées par BMA comparées avec les apports filtrés par horizon de prévision.
- Les valeurs de CRPS décomposé par horizon de prévision (1 à 10 jours à l'avance).
- Les histogrammes de rang pour les prévisions brutes et les prévisions post-traitées BMA pour juger si l'écart entre les membres est un indicateur adéquat de l'incertitude.
- Une comparaison de MAE entre les prévision probabilistes réduites et les séries-mères. Les quantiles 15% et 85% des prévisions probabilistes ont été calculées ainsi que la médiane pour la comparaison avec les quantiles des séries-mères.

Les figures ayant des informations redondantes ont été placées à l'annexe.

5.2.1 Baskatong

Les graphiques spaghetti pour Baskatong (figures 5.9, 5.11 et 5.13) montrent l'évolution des membres aberrants causés par une erreur dans le module de convection dans le modèle météorologique d'environnement Canada en 2012 (N. Gagnon, 2007).

Les graphiques spaghetti des prévisions brutes de Baskatong post-traitées avec le BMA gamma (figures 5.10, 5.12 et 5.14) montrent que les membres aberrants en 2012 sont éliminés. Toutefois les pointes de débit lors des crues de printemps montrent une incertitude plus grande que les prévisions brutes. Ce comportement est dû au fait que le BMA détériore la résolution au profit de la fiabilité pour avoir une meilleure représentation de l'incertitude.

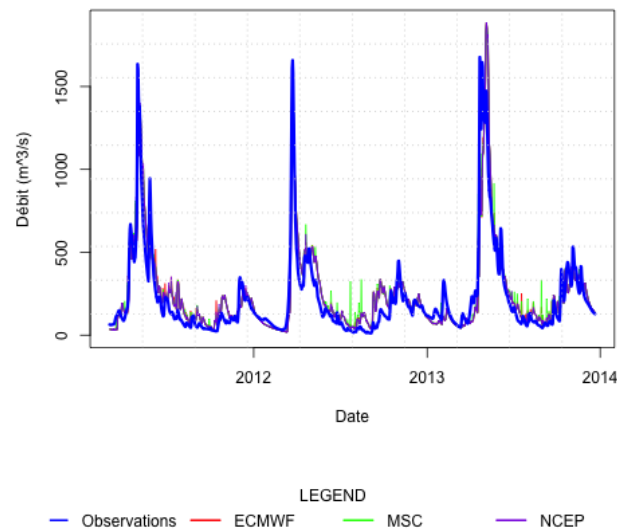


FIGURE 5.9 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

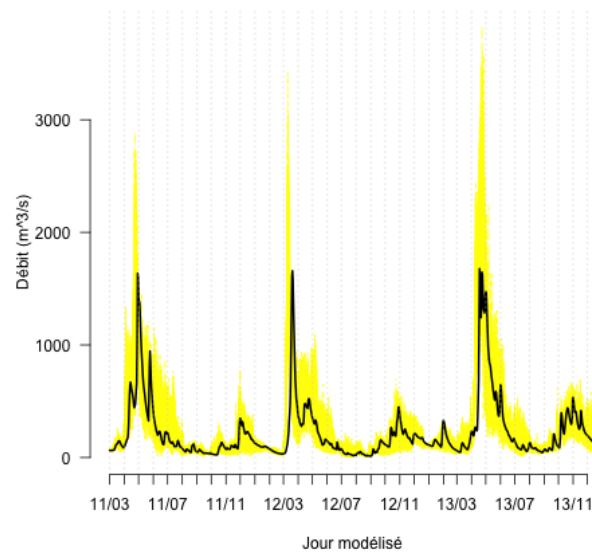


FIGURE 5.10 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

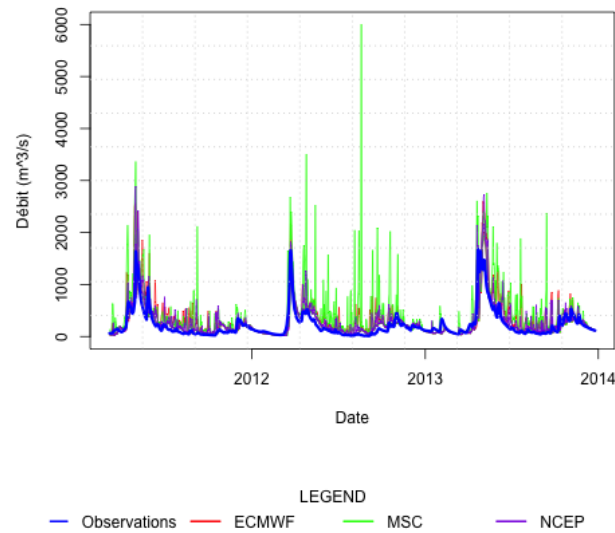


FIGURE 5.11 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

Le post-traitement multimodèle a servi à avoir un CRPS qui se démarque des prévisions probabilistes, et ce dès le deuxième jour (figure 5.15) notamment à cause d'une meilleure fiabilité. Sur cette même figure, le NCEP (États-Unis) et le ECMWF (Eu-

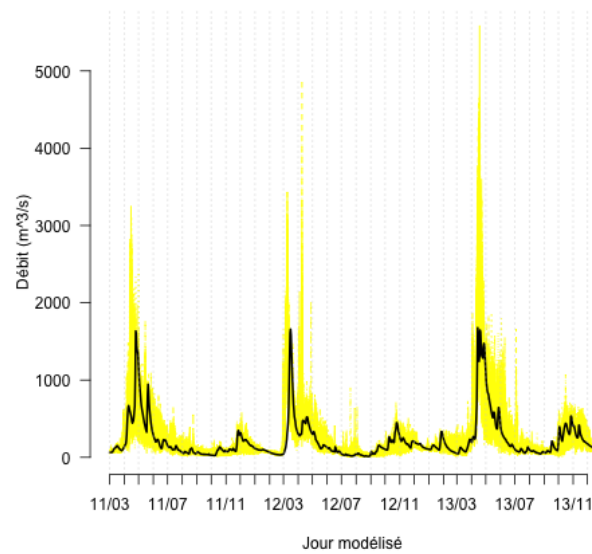


FIGURE 5.12 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

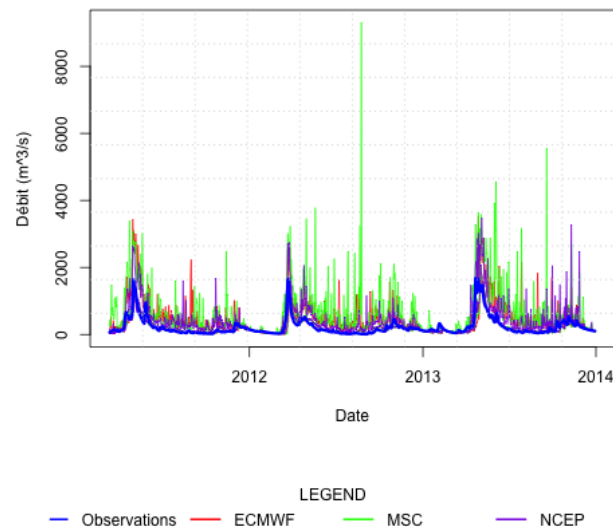


FIGURE 5.13 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour

rope) exhibent une performance quasi-identique tandis que le MSC (Canada) est celui qui arrive en dernière place. Le post-traitement arrive à corriger en grande partie la

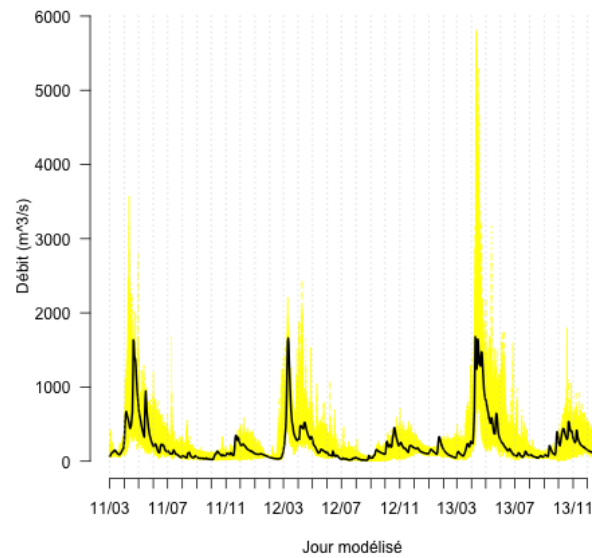


FIGURE 5.14 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

sous-dispersion des prévisions brutes montrées sur les histogrammes de rang de 5.16. Les prévisions post-traitées montrées à la figure 5.17 démontrent une évolution de la sous-dispersion au fur et à mesure que les horizons augmentent.

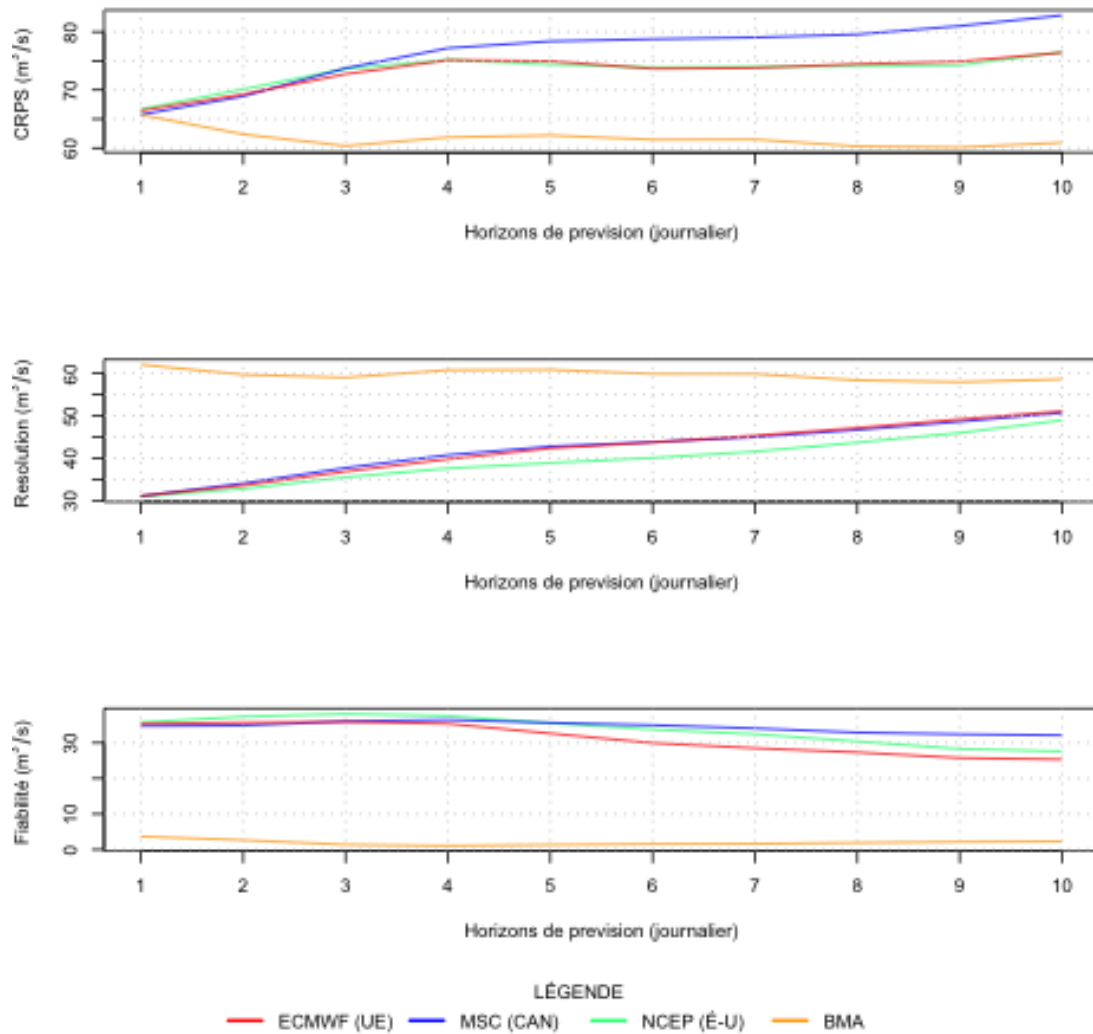


FIGURE 5.15 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA de Baskatong pour chaque horizon de prévision

Les prévisions probabilistes réduites sont meilleures que les séries-mères à partir de 3 jours pour le quantile 15% et 6 jours pour le 80% (figure 5.18). On remarque que les prévisions produites à partir des prévisions météorologiques du modèle canadien sont moins bonnes que celles obtenues à partir des modèles NCEP (États-Unis) et ECMWF (Europe).

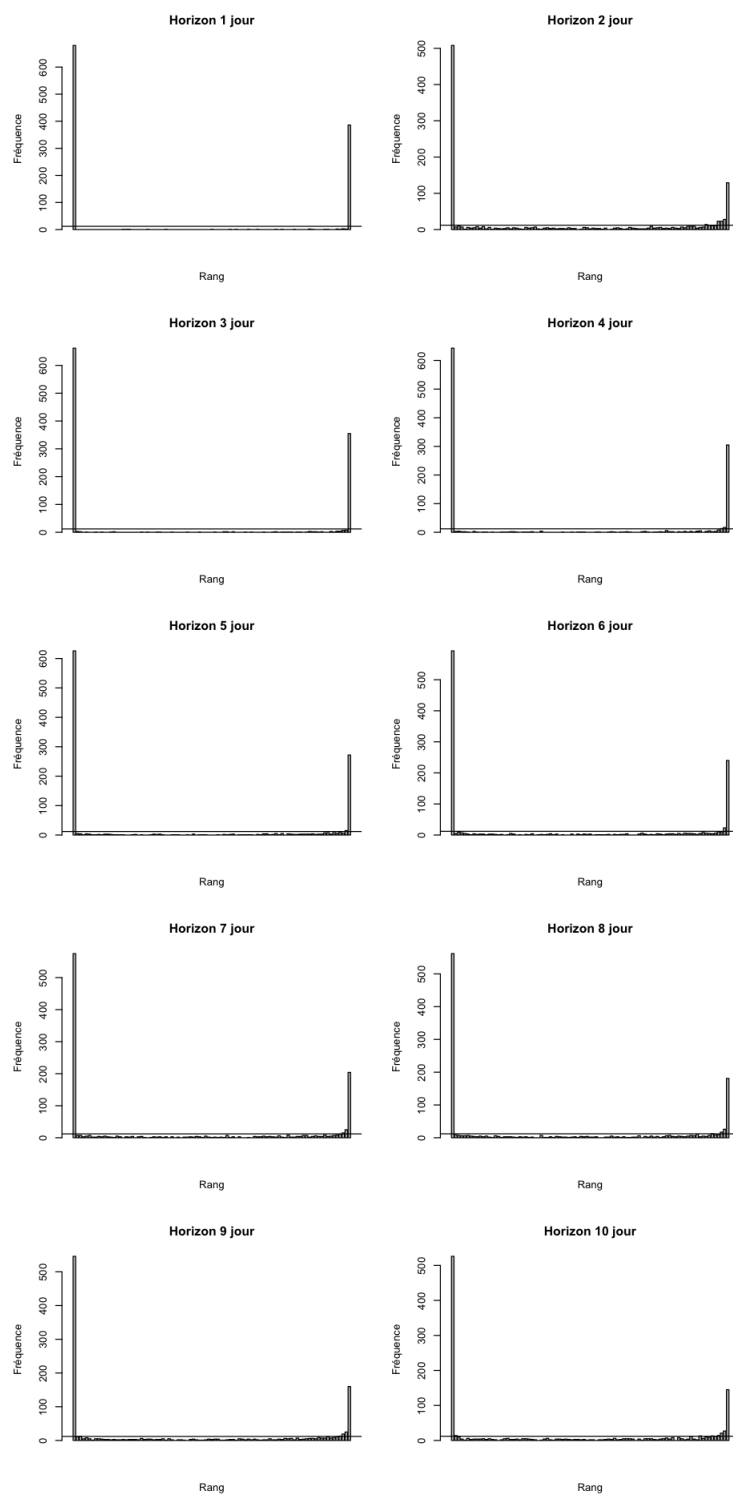


FIGURE 5.16 – Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour Baskatong de 2011 à 2013

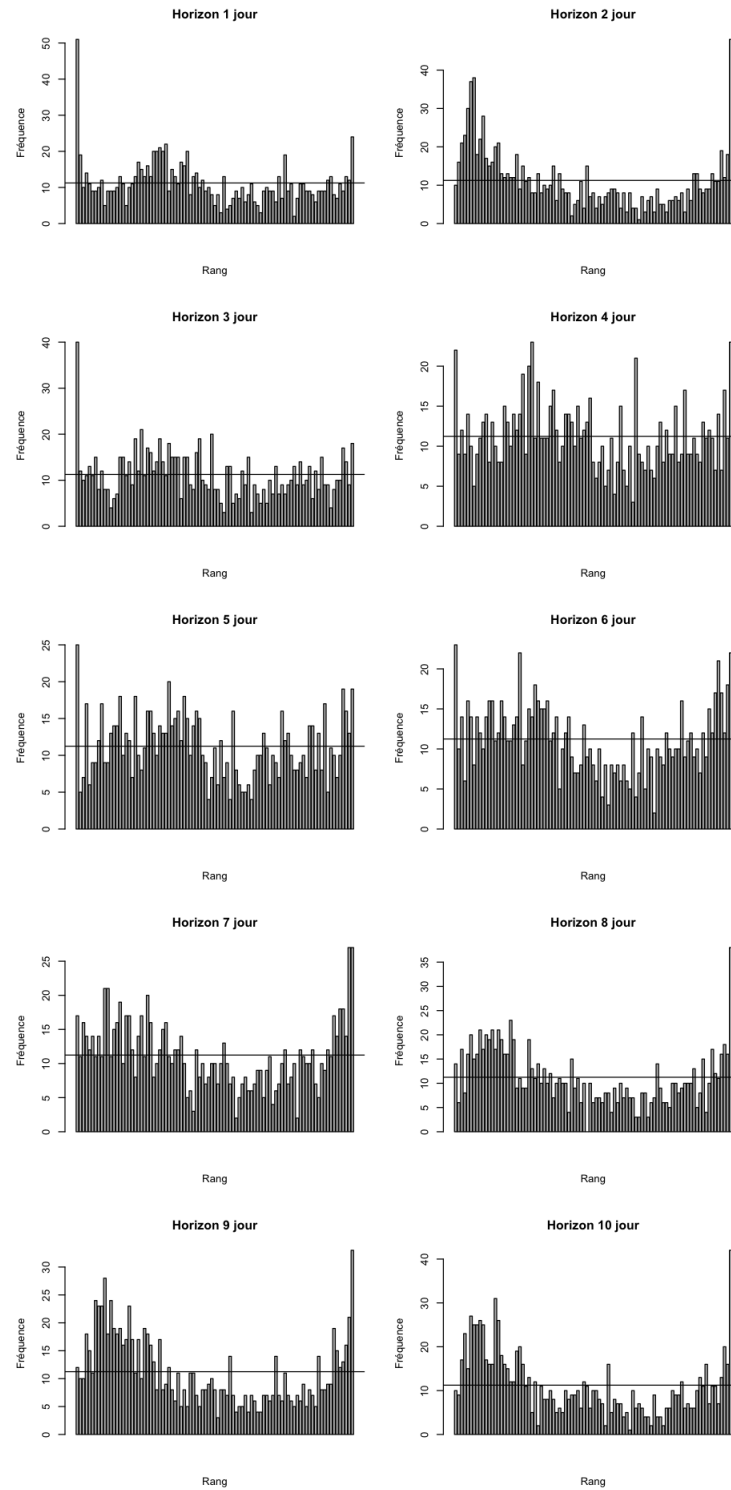


FIGURE 5.17 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour Baskatong de 2011 à 2013

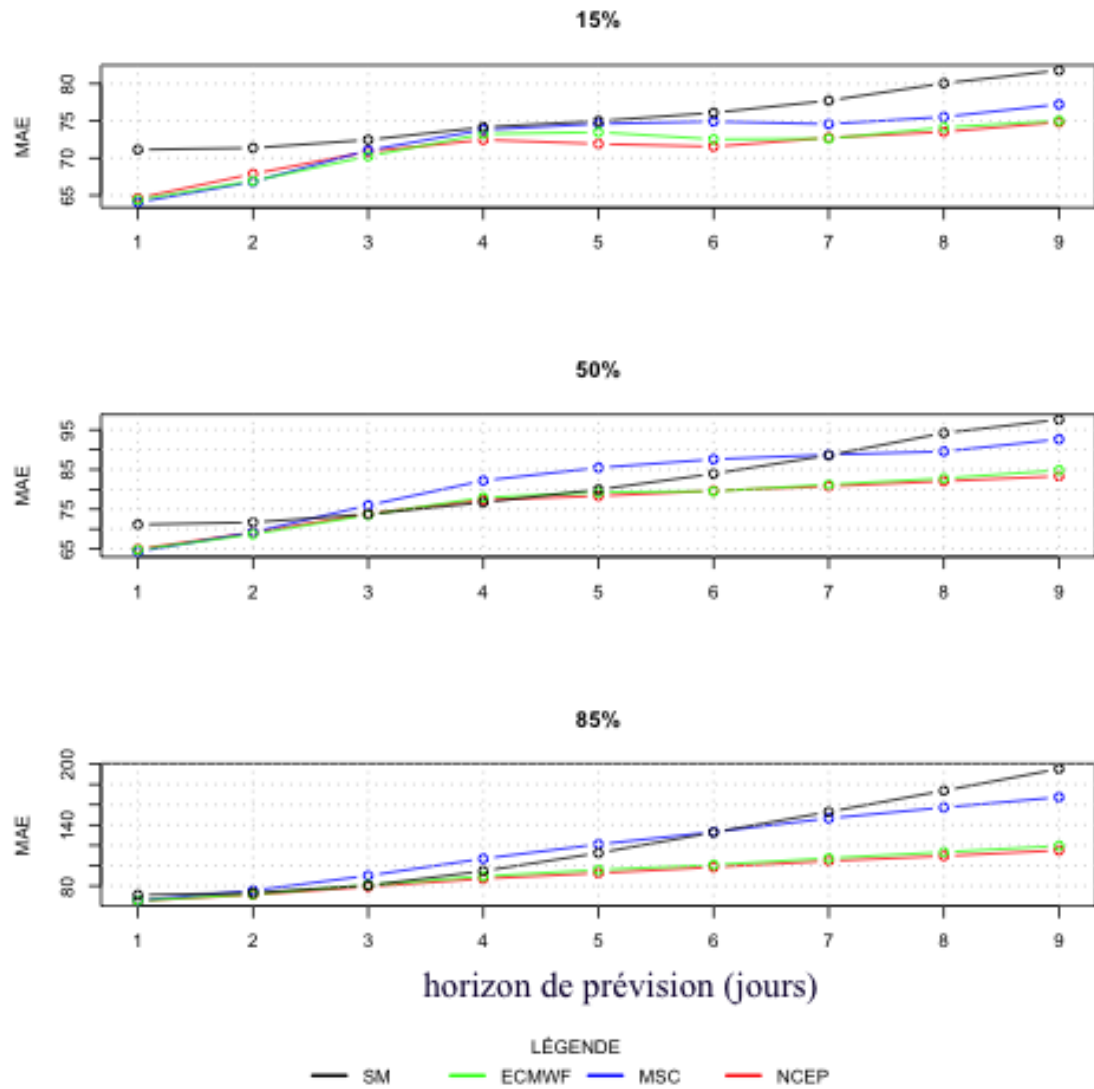


FIGURE 5.18 – Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour Baskatong

5.2.2 La Grande 4

Tel qu'il est apparent dans les figures 5.19, 5.21 et 5.23, un biais négatif est remarqué au niveau de la prévision de débit. De plus, les prévisions issues du centre canadien produisent des débits aberrants en 2012 comme observé pour les autres bassins. Comparativement aux deux autres, ce sont les prévisions du centre canadien qui démontrent les débits les plus extrêmes. D'autre part, des débits forts issus du centre américain ont été produits en 2013 dès l'horizon 5.

Également, La Grande 4 possède la plus grande superficie parmi les trois bassins analysés. Afin d'estimer les intrants, un seul point de grille a été utilisé. Ceci peut être une des sources d'erreur qui cause le biais. De plus, la pluie directe au réservoir n'est pas prise en compte par le modèle hydrologique, ceci peut expliquer le fait que certaines pointes n'ont pas pu être bien prises en compte. La sous-estimation du volume pourrait également être améliorée si l'assimilation des relevés de neige aurait été faite avant la crue.

Le BMA gamma a été efficace pour effacer les débits aberrants en 2012 tel que vu aux figures 5.20, 5.22 et 5.24. Ceci est dû au fait qu'une plus grande pondération est attribuée aux centres qui ont le mieux fait pendant la période d'entraînement de 60 jours précédant le jour de prévision. Le centre canadien n'ayant pas été celui qui présentait la meilleure performance, alors les pointes aberrantes ont été enlevées. C'est le cas inverse lors de 2013. Le centre américain avait une performance uniforme avant l'arrivée de la première pointe. La pointe a donc été conservée comme information pour créer la prédictive multi-modèle.

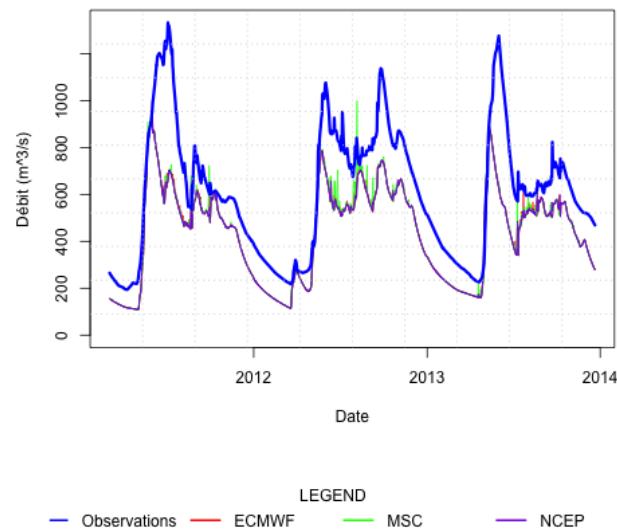


FIGURE 5.19 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

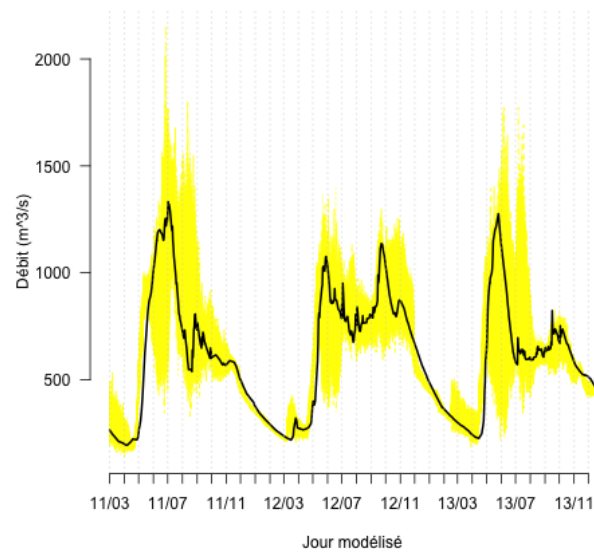


FIGURE 5.20 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

L'avantage du BMA gamma est très clair dans la figure 5.25. Le fait que les prévisions post-traitées arrivent à débiaiser les prévisions (régression linéaire) pour ensuite ajuster leur résolution fait toute la différence et justifie un écart si grand avec les prévisions

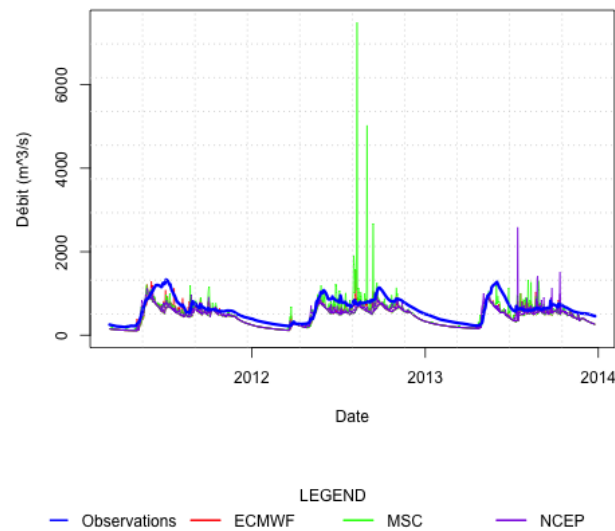


FIGURE 5.21 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour

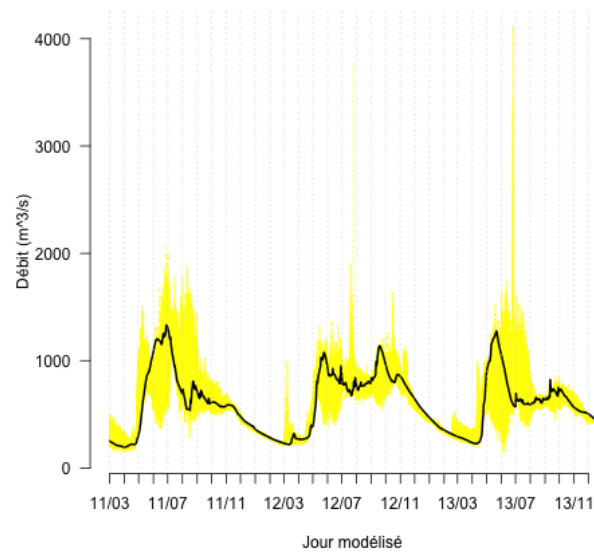


FIGURE 5.22 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour

brutes.

Avec des prévisions avec un biais négatif si évident il est normal d’avoir un histogramme de rang à la figure 5.26 qui montre une fréquence si haute dans sa dernière

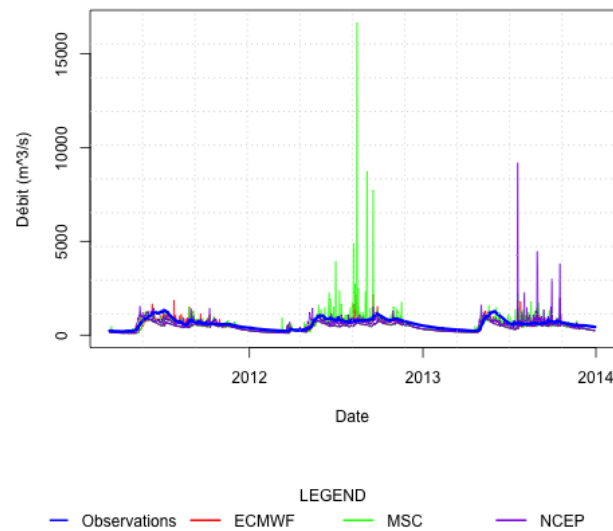


FIGURE 5.23 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

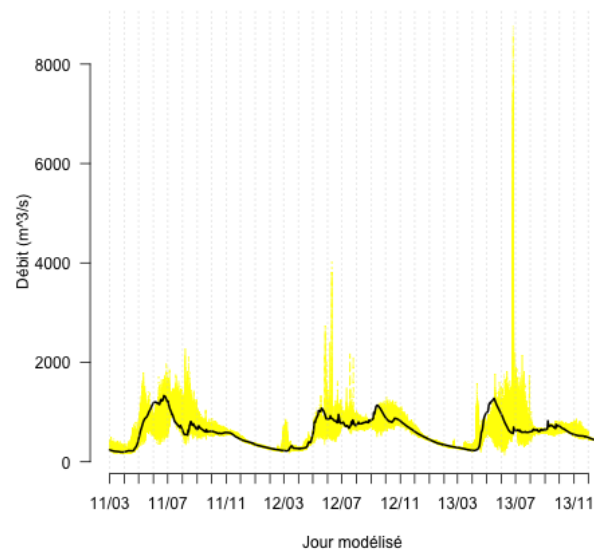


FIGURE 5.24 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

classe qui est la preuve d’un biais de prévisions sous-estimée.

Les histogrammes de rang après le BMA gamma à la figure 5.27 montrent de la sous-dispersion. Toutefois, L’axe des ordonnées montrent une distribution plus uniforme des

observations qui se situent parmi les membres intermédiaires.

Finalement, les performances des quantiles des séries-mères sont comparées avec les prévisions probabilistes à la figure 5.28 et les prévisions probabilistes offrent une meilleure performance en général.

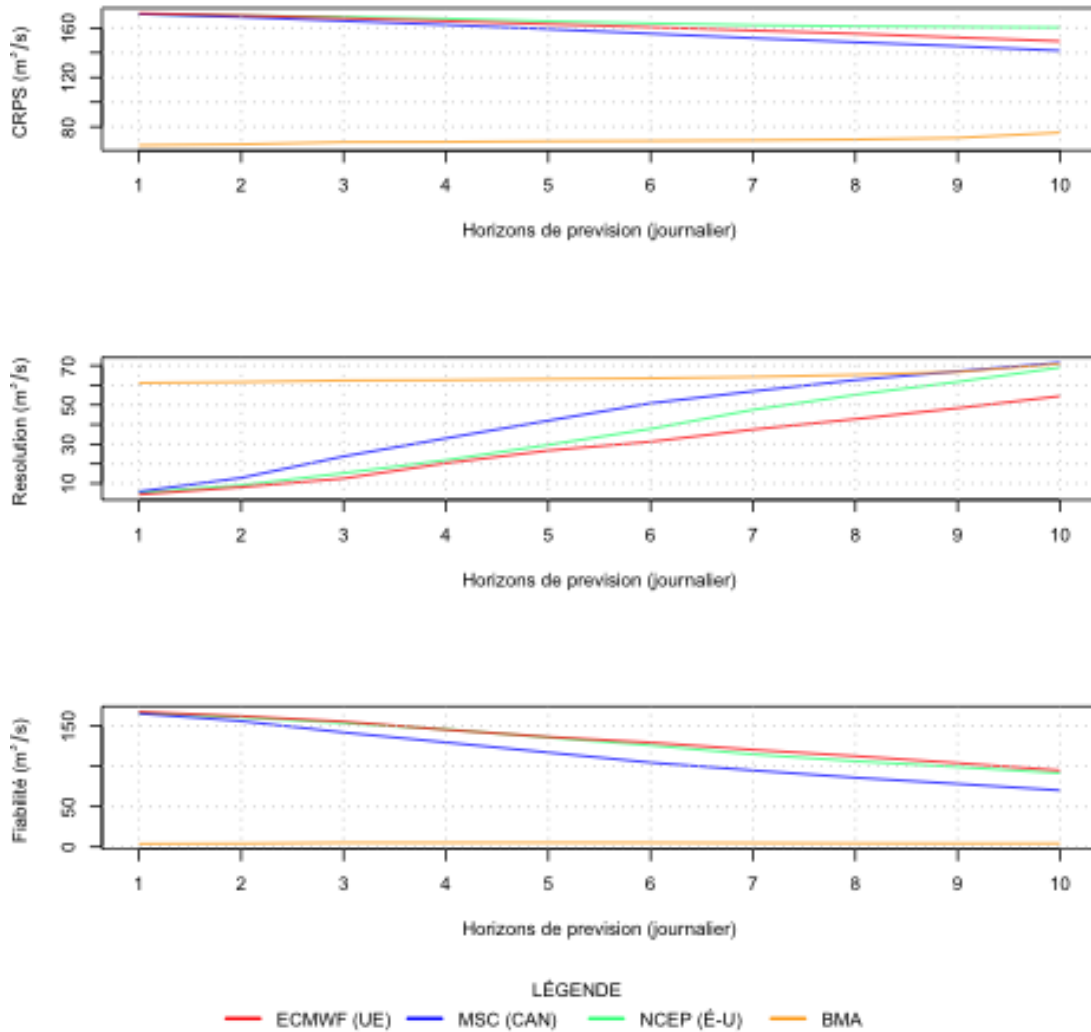


FIGURE 5.25 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA gamma de La Grande-4 pour chaque horizon de prévision

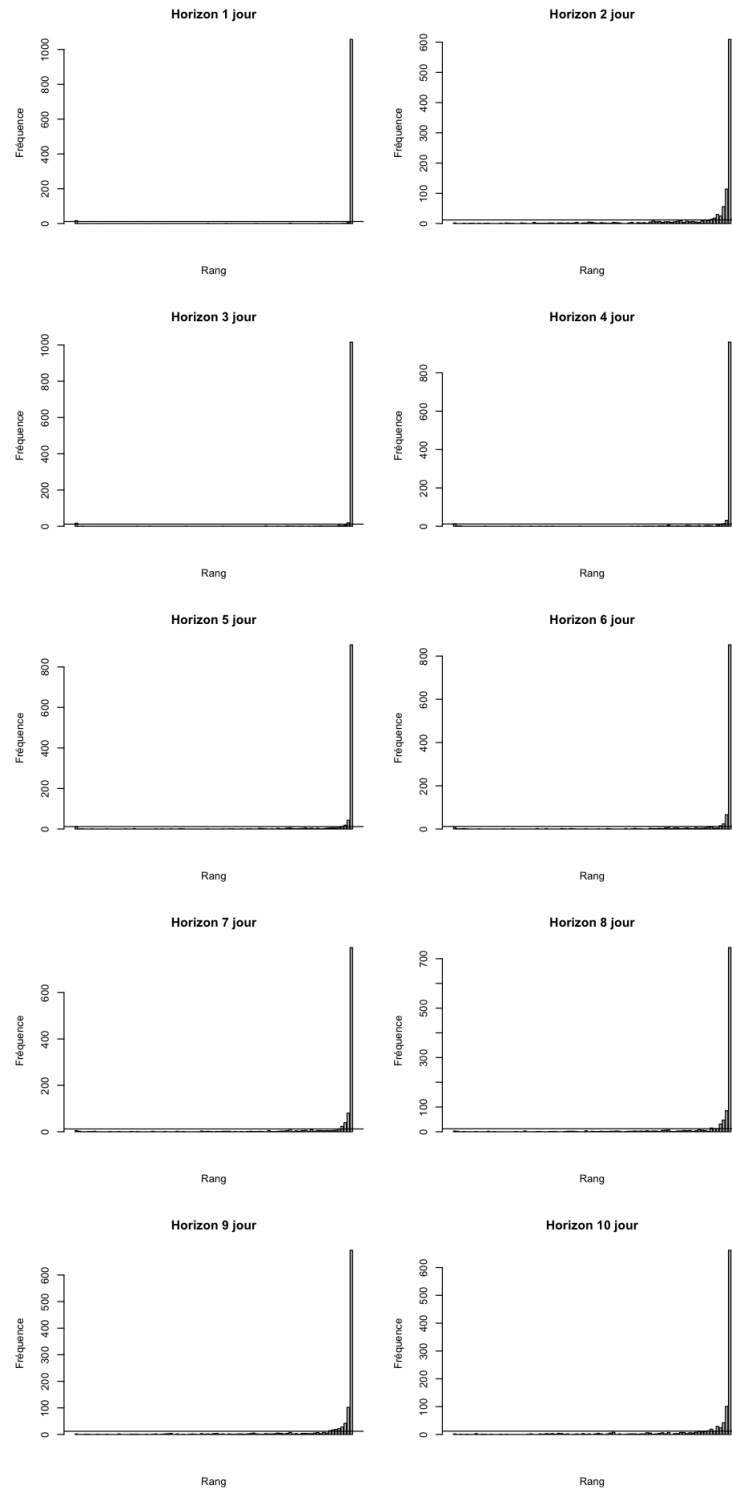


FIGURE 5.26 – Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour La Grande-4 de 2011 à 2013

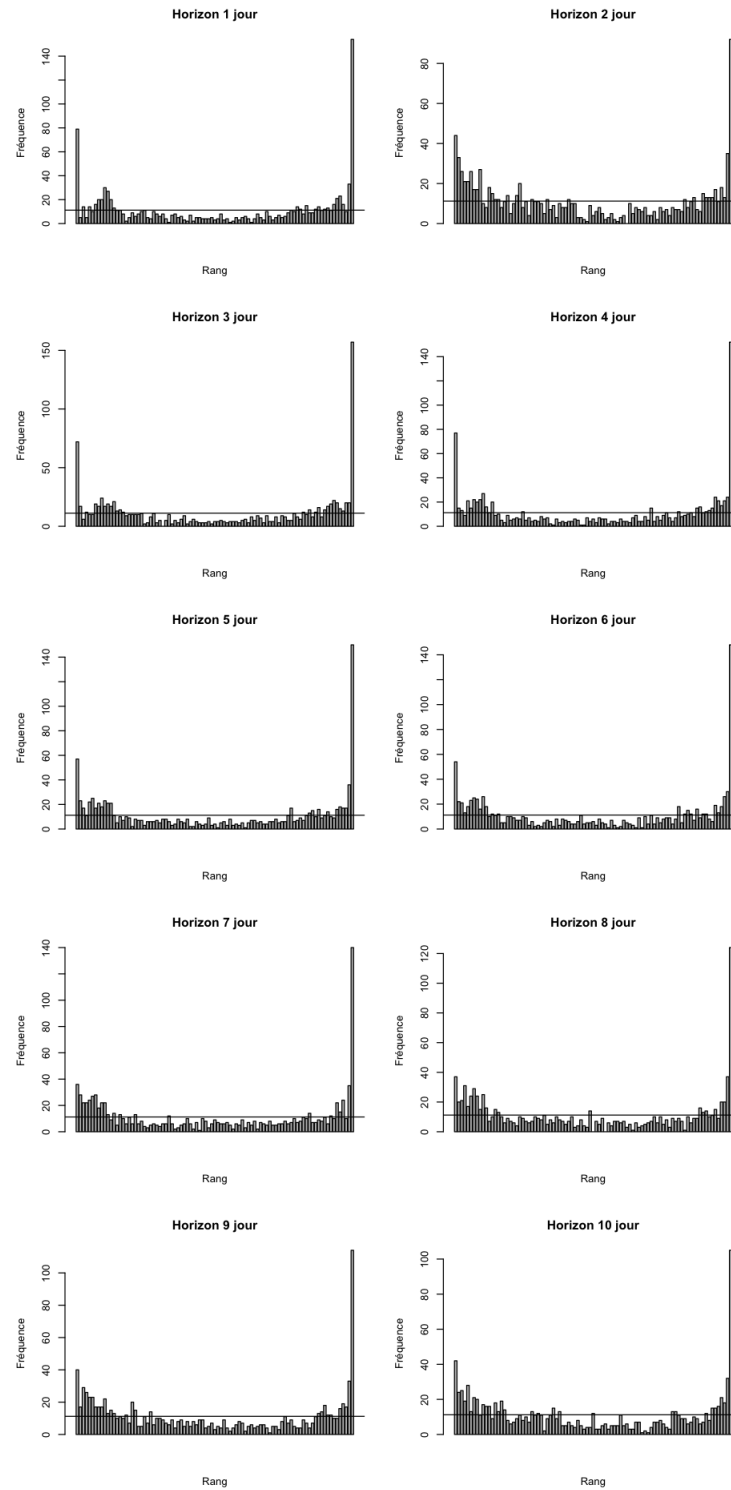


FIGURE 5.27 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour La Grande-4 de 2011 à 2013

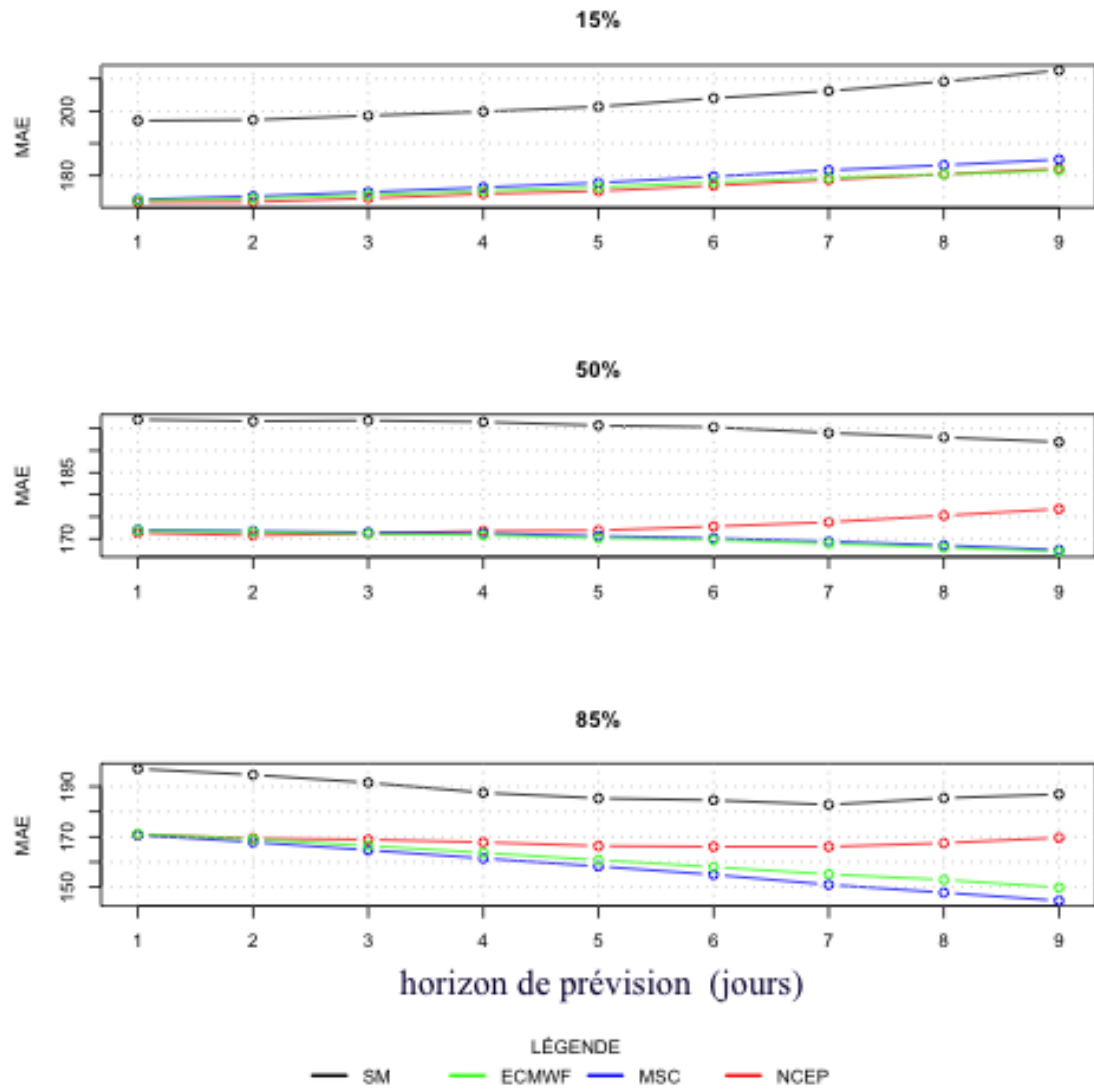


FIGURE 5.28 – Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour La Grande 4 pour chaque horizon de prévision

5.2.3 Outardes 4

Les prévisions hydrologiques brutes montrent un comportement analogue à celles pour Baskatong, c'est-à-dire que les prévisions suivent la tendance des apports filtrés quoique certains centres semblent sur-estimer l'apport notamment le ECMWF (Europe) en 2011, Le MSC (Canada) en 2012 et le NCEP (États-Unis) en 2013 (5.29, 5.31 et 5.33).

Les prévisions probabilistes post-traitées pour Outardes-4 montrent un faisceau d'incertitude qui recouvre adéquatement les observations (5.30, 5.32 et 5.34).

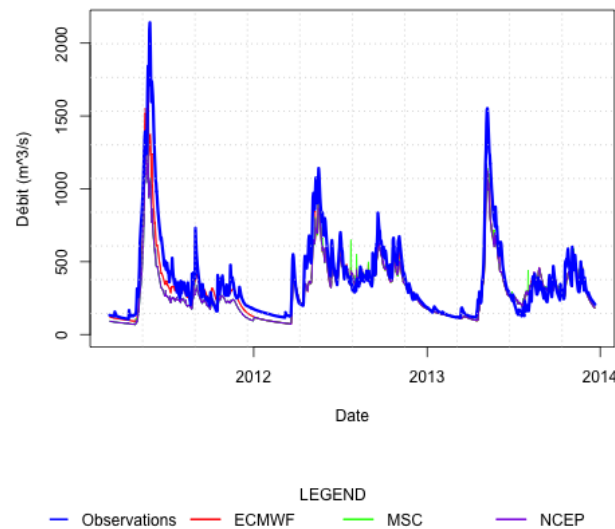


FIGURE 5.29 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

Les prévisions de débit produites à partir des prévisions météo d'ensemble du ECMWF (Europe) sont celles qui ont le meilleur CRPS à tous les horizons (5.35). Le gain fait par le BMA en fiabilité n'a pas suffi pour qu'il soit le meilleur, cependant il est moins sous-dispersé que les prévisions du Grand Ensemble (5.36 et 5.37). Toutefois, le BMA gamma n'a pas été aussi efficace pour Outardes-4 que pour Baskatong pour éliminer la sous-dispersion, d'ailleurs un biais de sur-estimation est identifiable à tous les horizons.

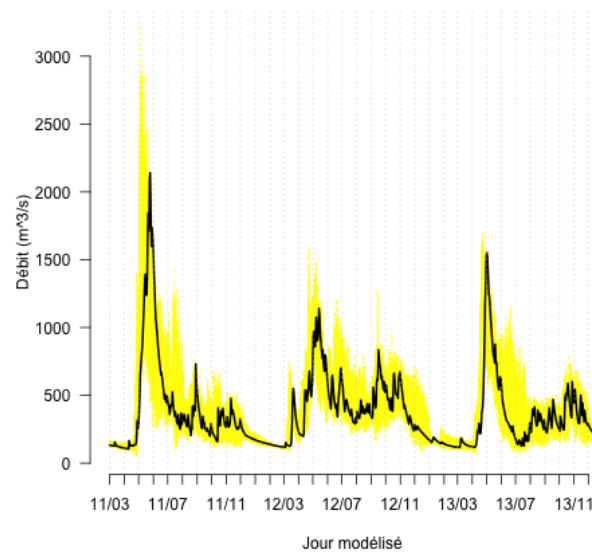


FIGURE 5.30 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

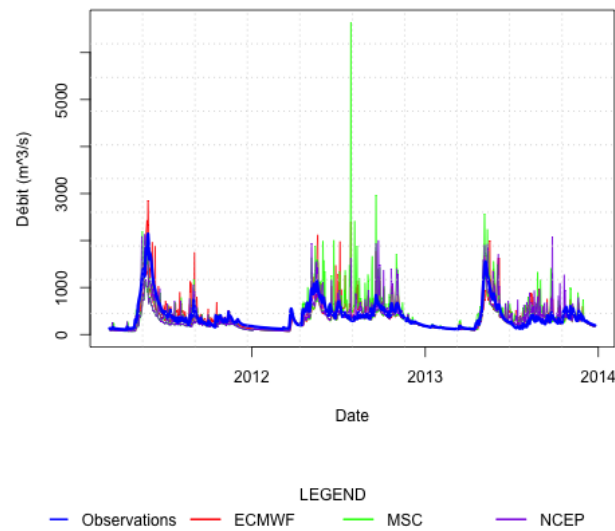


FIGURE 5.31 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

Les quantiles de séries-mères sont ceux qui ont la meilleure performance au niveau du MAE pour le quantile 50% (voir figure 5.38). Pour ce qui est des quantiles 15% et 85%, c'est le ECMWF qui démontre les meilleurs résultats pour les horizons de prévision

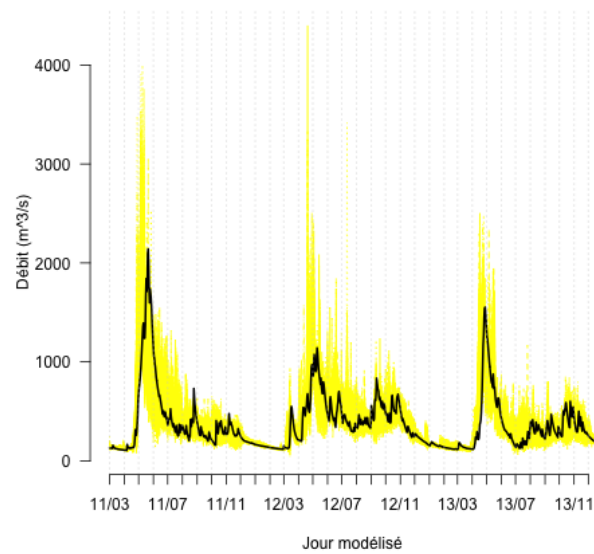


FIGURE 5.32 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

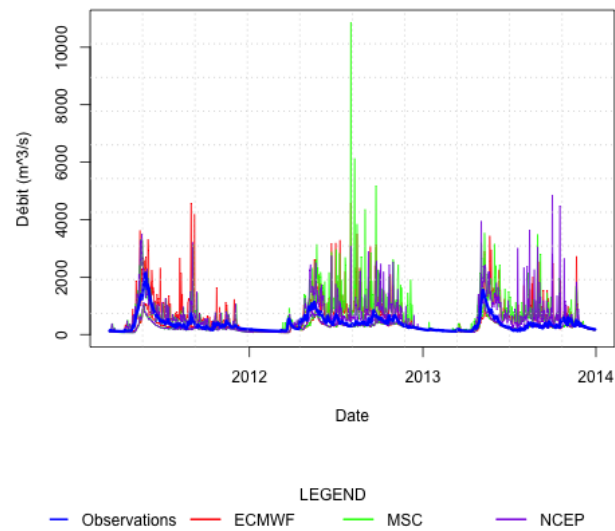


FIGURE 5.33 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour

à partir de 6 jours.

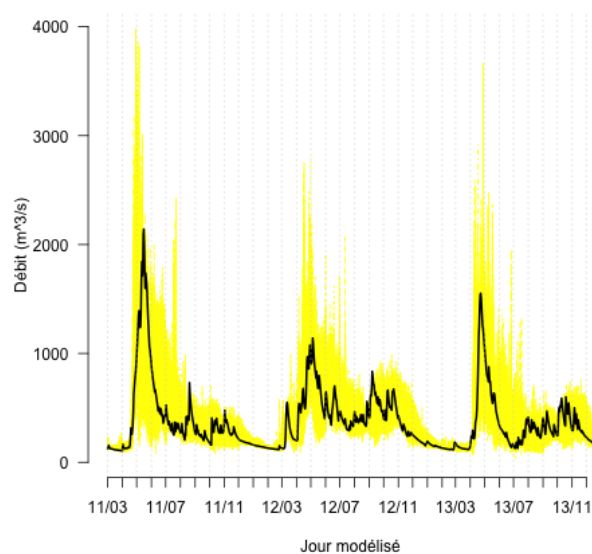


FIGURE 5.34 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA gamma pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

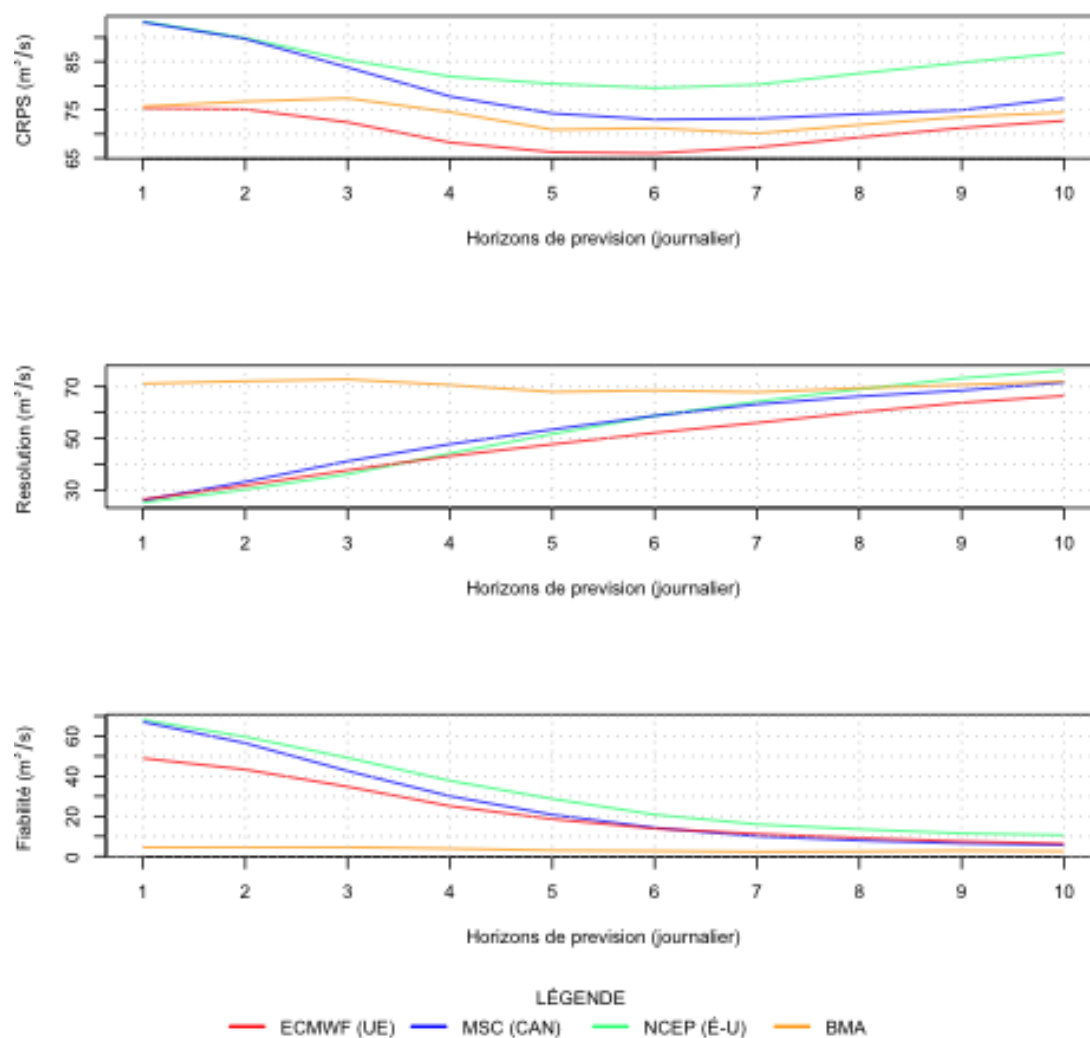


FIGURE 5.35 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA gamma de Outardes-4 pour chaque horizon de prévision

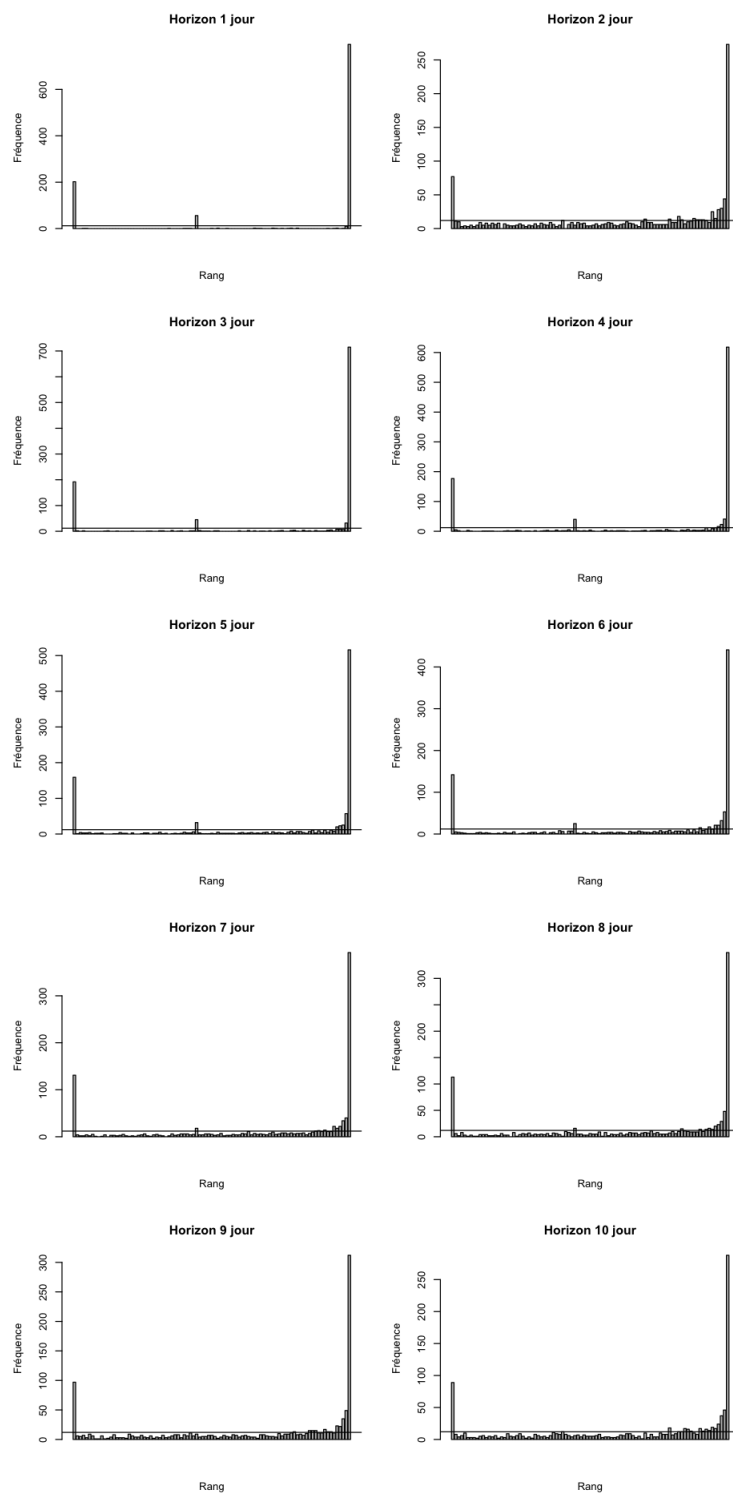


FIGURE 5.36 – Histogramme de rang pour le Grand Ensemble (90 membres) pour Outardes-4 de 2011 à 2013

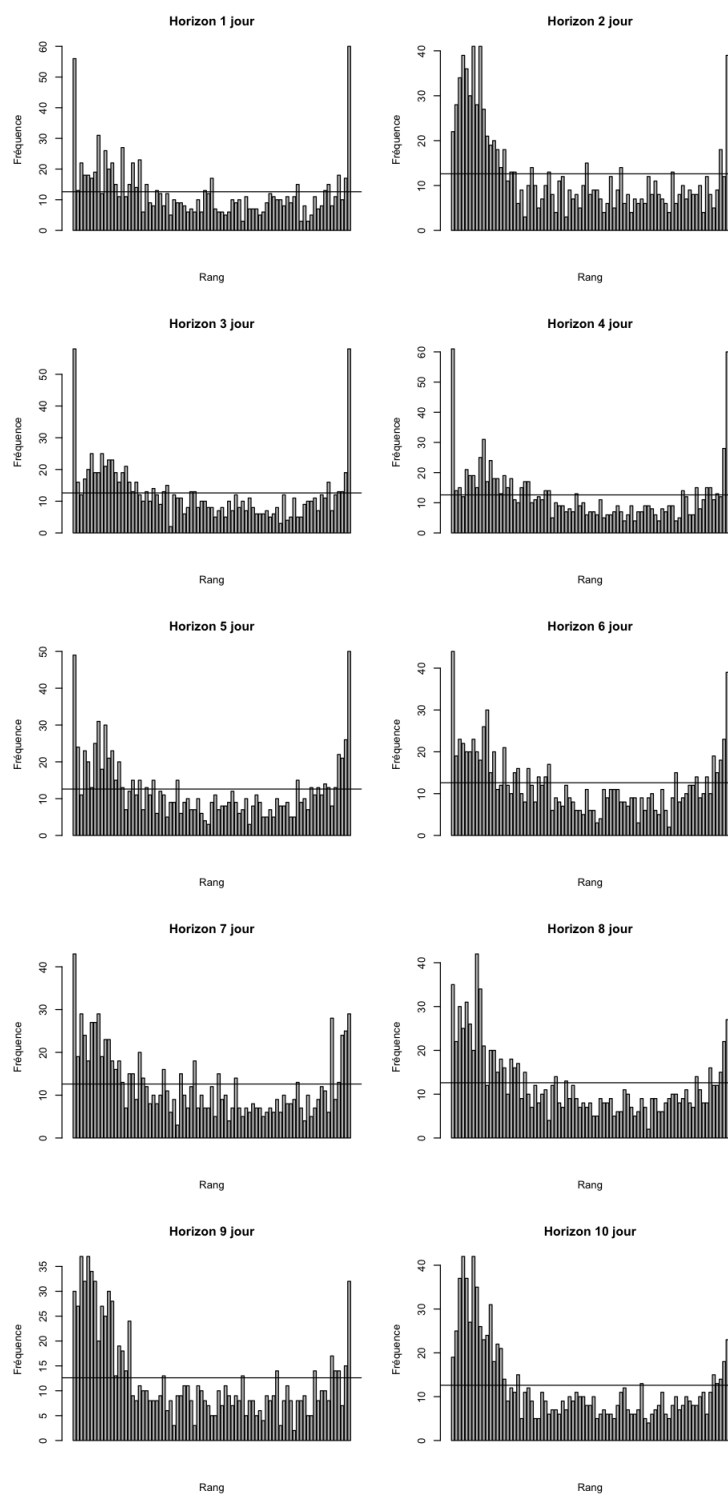


FIGURE 5.37 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA gamma pour Outardes-4 de 2011 à 2013

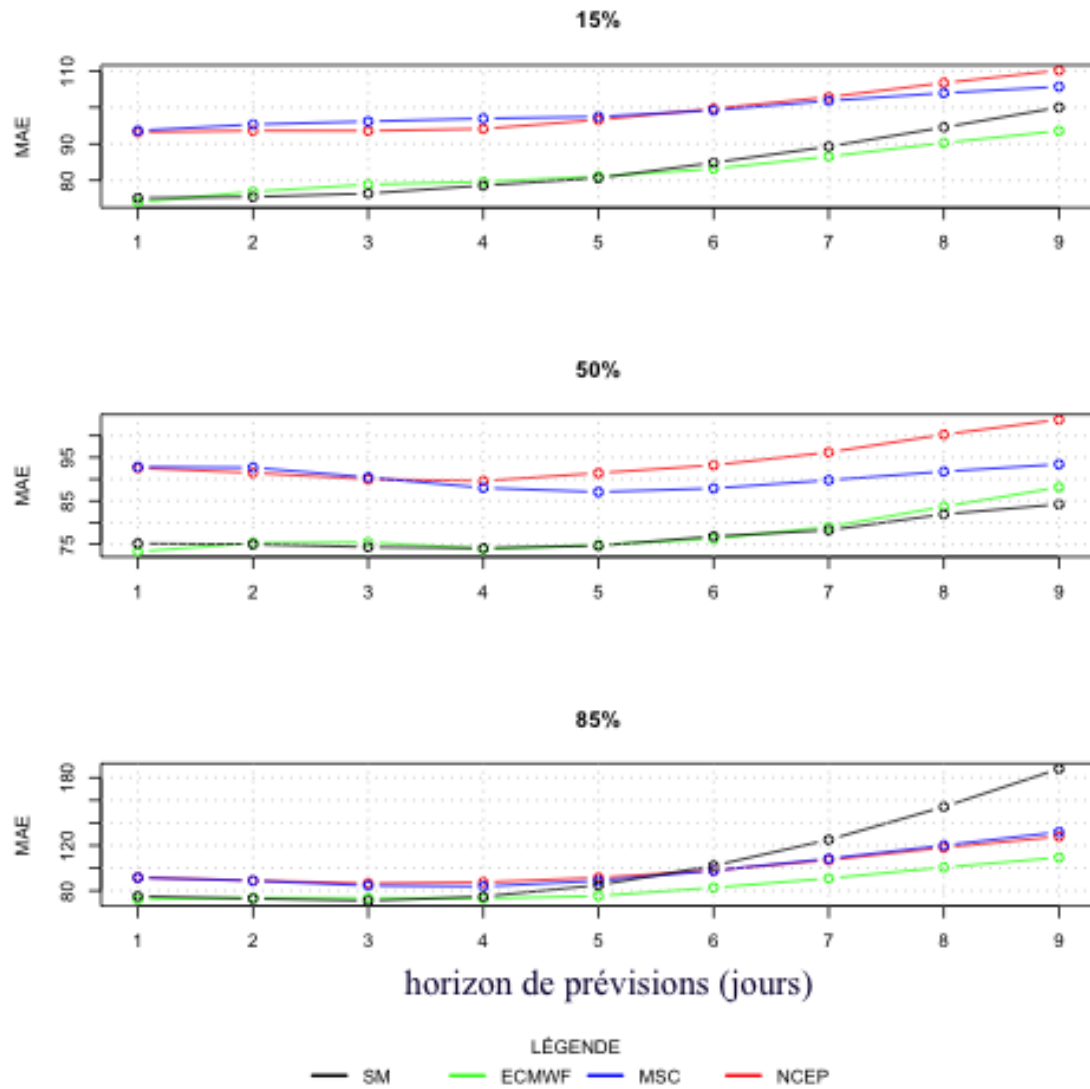


FIGURE 5.38 – Comparaison des prévisions probabilistes avec les séries-mères pour Outardes 4 pour chaque horizon de prévision

5.3 Prévisions hydrologiques pré-traitées

Le post-traitement par la méthode du BMA en utilisant une transformation NQT et un mélange de lois normales a été essayé sans succès avec les prévisions d'ensemble de débit brutes. La raison était la trop grande variance entre les membres qui empêchait la convergence lors de l'estimation des paramètres.

Afin de remédier à ce problème, il a été décidé de les membres de prévision météo qui démontraient des précipitations aberrantes. Ainsi, la variance entre les membres a été réduite. Il s'agit en quelque sorte d'une forme de pré-traitement, qui vise à conserver uniquement les membres réalistes des ensembles météo. Les membres aberrants ont été enlevés. Ces membres étaient ceux qui exhibaient des précipitations aberrantes.

Les membres aberrants avaient tendance à montrer un débit qui devenait de plus en plus grand à mesure que l'horizon de prévision grandissait. Ainsi, certains membres pouvaient se comporter de manière plausible jusqu'à l'horizon de prévision 4 jours pour ensuite démontrer un accroissement considérable au niveau du débit. Ce débit ne faisait que s'aggraver au fur et à mesure et pouvait être tout à fait impossible à l'horizon 10 comme à la figure 5.13.

Des membres ont été retirés pour La Grande 4 et Outardes 4 mais pas pour Baskatong car malgré que des débits très forts sont prévus, la pluie prévue n'est pas aberrante. La liste des membres retirés pour les trois années à l'étude est montrée dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1: Membres aberrants retirés du Grand Ensemble pour Outardes 4 et La Grande 4

Outardes 4						
Membres MSC (Canada)	2	5	9	10		
Membres ECMWF (Europe)	22	37	49			
Membres NCEP (États-Unis)	1	3	11	19		
La Grande 4						
Membres MSC (Canada)	3	6	9	11		
Membres NCEP (États-Unis)	1	3	4	8	16	17

Un autre point important à signaler est le fait que l'estimation des paramètres du BMA a fonctionné pour diverses tailles de fenêtres d'entraînement. Les fenêtres d'entraînement testées vont de 20 à 60 jours par incrément de 10 jours. La meilleure performance a été atteinte à 60 jours d'entraînement et c'est cette approche qui a été conservée dans la présentation des résultats. En guise de comparaison, l'ajustement gamma a seulement convergé à tous les horizons de prévision pour une fenêtre de 60 jours d'entraînement.

5.3.1 Baskatong

Aucun membre n'a été enlevé dans les prévisions d'ensemble de Baskatong. Pour avoir un aperçu des graphiques spaghettis des prévisions hydrologiques brutes pour Baskatong, il faut se rapporter aux figures 5.9, 5.11 et 5.13 de la section 5.2.1.

Le post-traitement de type BMA normal suit bien les tendances de l'hydrogramme observé pour un horizon d'un jour tel que vu à la figure 5.39. Le fait que la pointe de crue soit modélisée de manière si fidèle (montée rapide et décalage temporel mineur par rapport à la vraie pointe) est très satisfaisant.

Toutefois, les horizons de prévision de 5 jours et de 10 jours (figures 5.40 et 5.41 respectivement) comportent des membres qui surestiment beaucoup le débit observé.

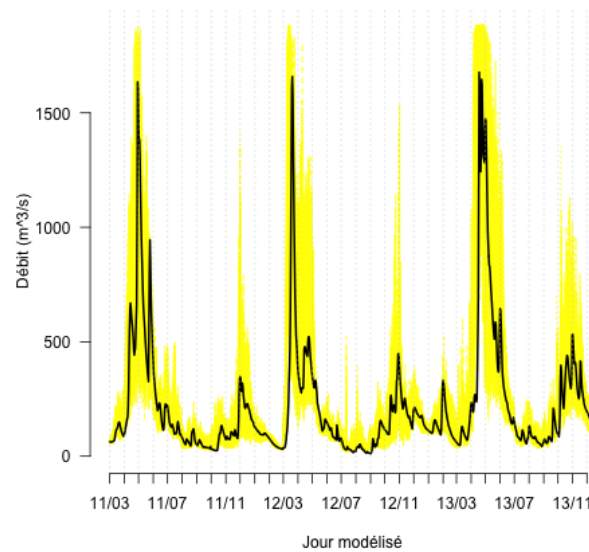


FIGURE 5.39 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

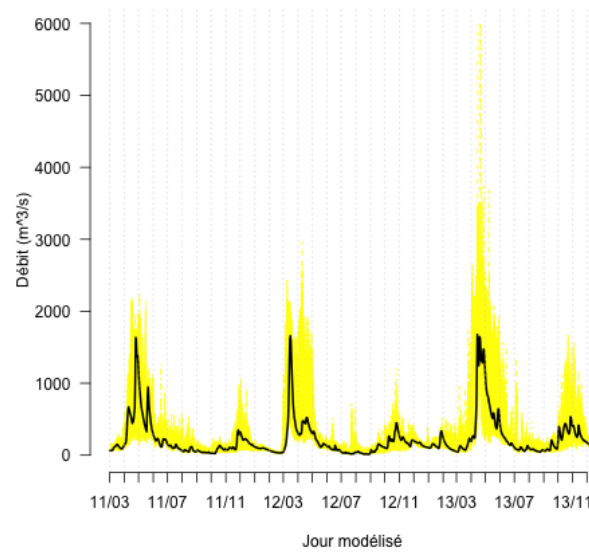


FIGURE 5.40 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour

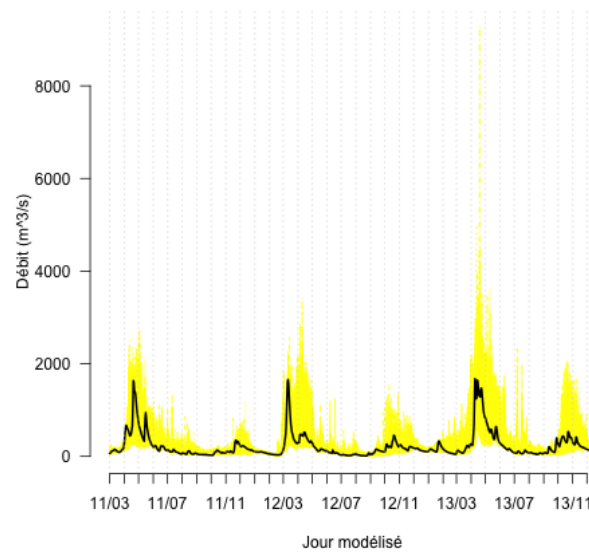


FIGURE 5.41 – Graphique spaghetti des apports à Baskatong post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

L’évolution du CRPS par rapport à l’horizon de prévision est illustrée à la figure 5.42. L’application du BMA normal est celle qui a offert la meilleure performance en terme de CRPS en plus d’offrir une performance égale à tout horizon de prévision. Un

autre fait à remarquer est la quasi équivalence du NCEP (États-Unis) et du ECMWF (Europe).

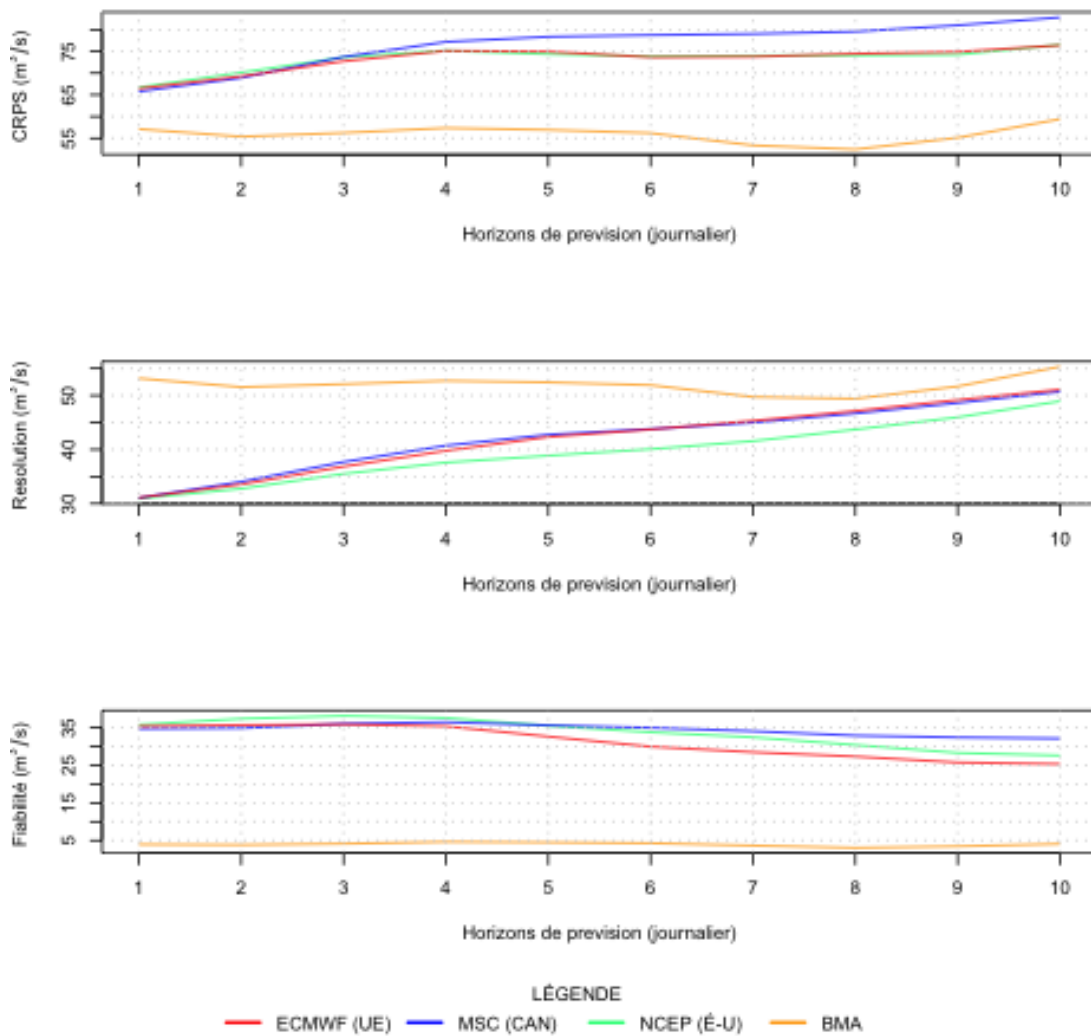


FIGURE 5.42 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de Baskatong pour chaque horizon de prévision

L'histogramme de rang résultant du post-traitement de type BMA normal illustre un biais positif important, c'est-à-dire que la prévision d'ensemble sous-estime les débits (5.43), même après un post-traitement.

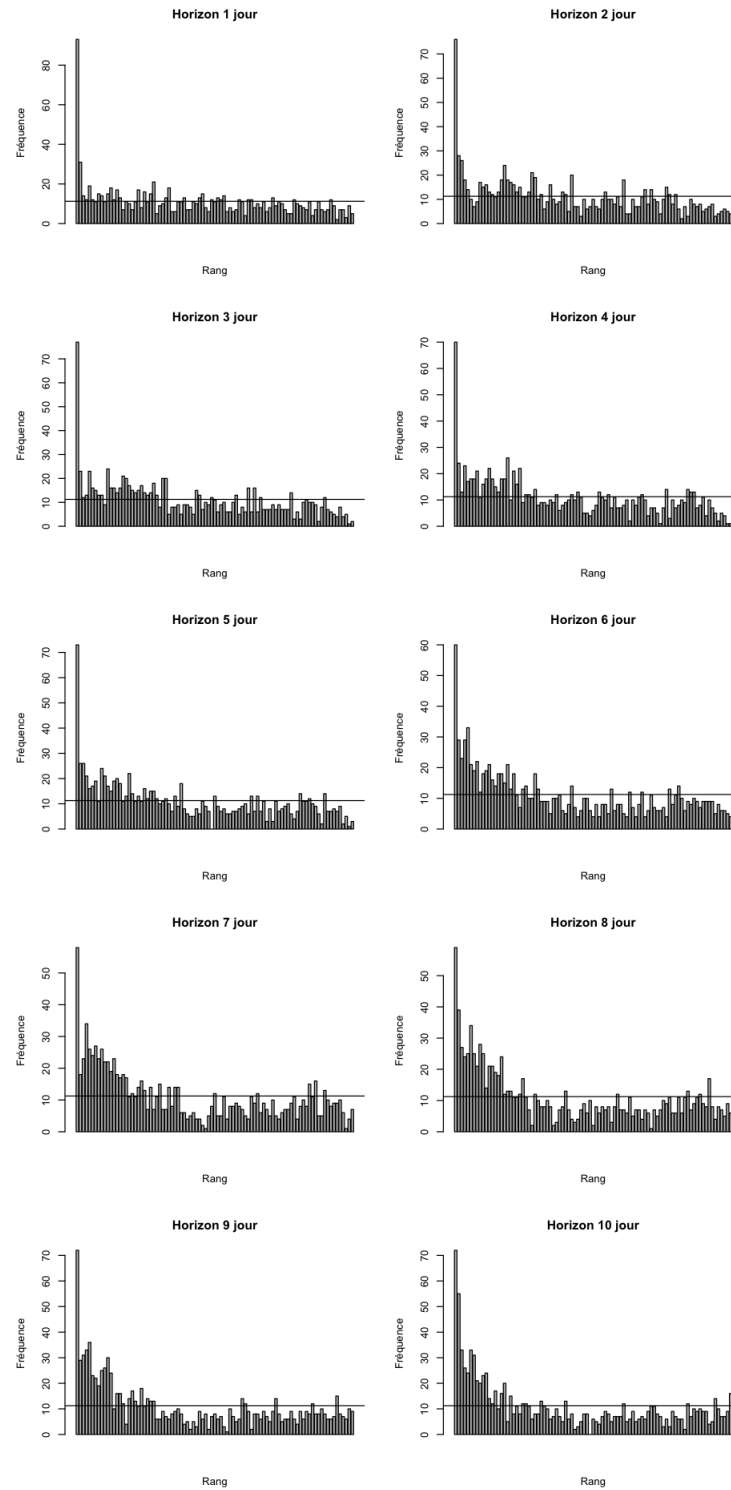


FIGURE 5.43 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA normal pour Basketong de 2011 à 2013

5.3.2 La Grande 4

Les prévisions d'ensemble météorologiques brutes pour le bassin de La Grande 4 comportaient certains membres aberrants (5.19, 5.21 et 5.23). Les prévisions post-traitées offrent un portrait plus adéquat de la prévision, malgré que le biais de sous-estimation existe encore (voir les figures 5.44, 5.46 et 5.48).

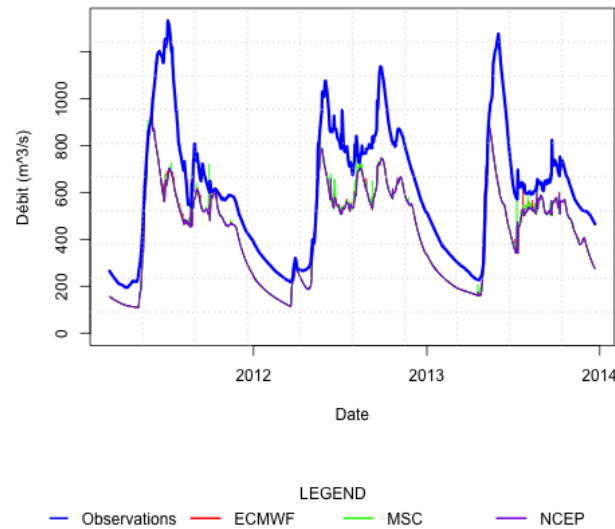


FIGURE 5.44 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

Le post-traitement BMA normal n'a pas eu le même effet pour des prévisions biaisées que le BMA gamma. La couverture de la prévision sur l'observation est complètement décalée et ne modélise pas la pointe de crue (figures 5.45, 5.47 et 5.49).

Les figures 5.50 et 5.51 illustrent l'échec de la méthode du BMA normal par rapport à chacun des centres météorologiques considérés individuellement. Malgré que le BMA normal soit plus performant que les prévisions d'ensemble du NCEP, les prévisions post-traitées présentent encore un biais de sous-estimation remarquable. Ce n'était pas le cas avec le post-traitement de type BMA gamma (figure 5.27).

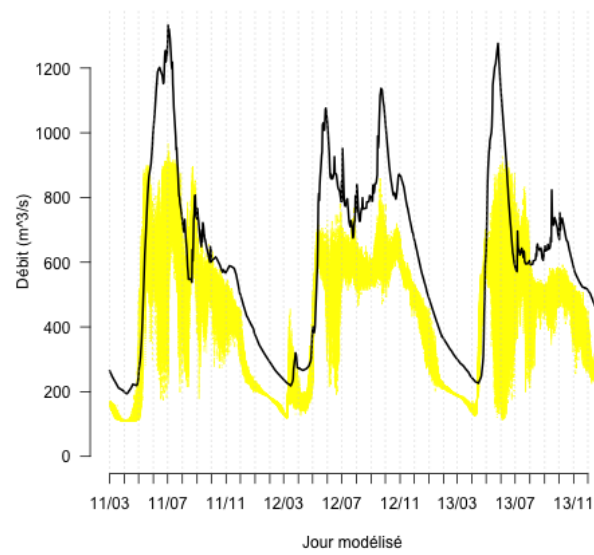


FIGURE 5.45 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 1 jour

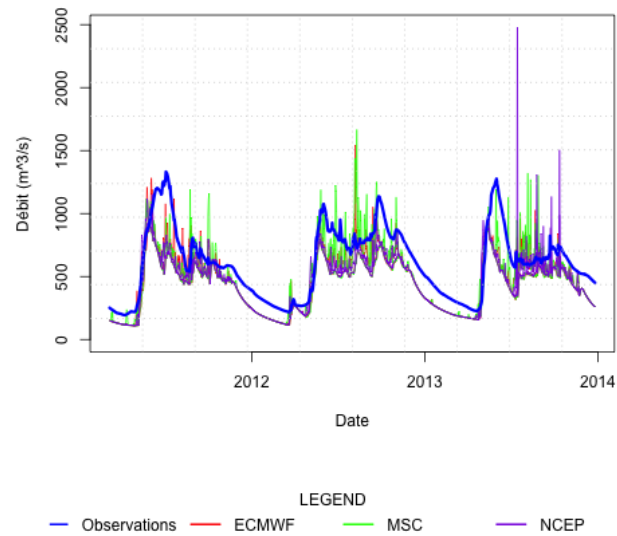


FIGURE 5.46 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour

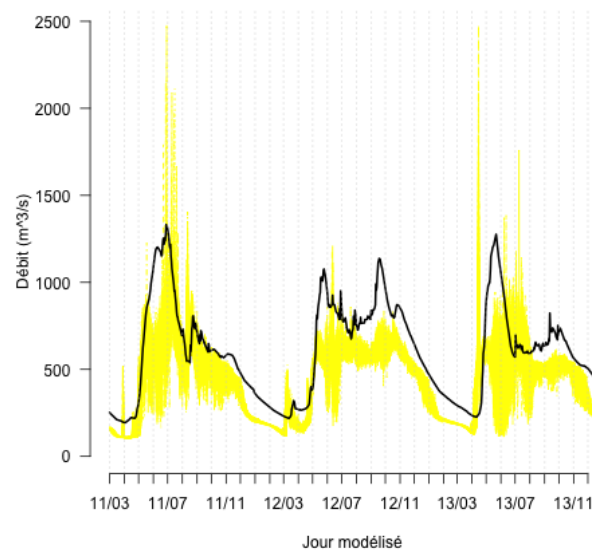


FIGURE 5.47 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 5 jour

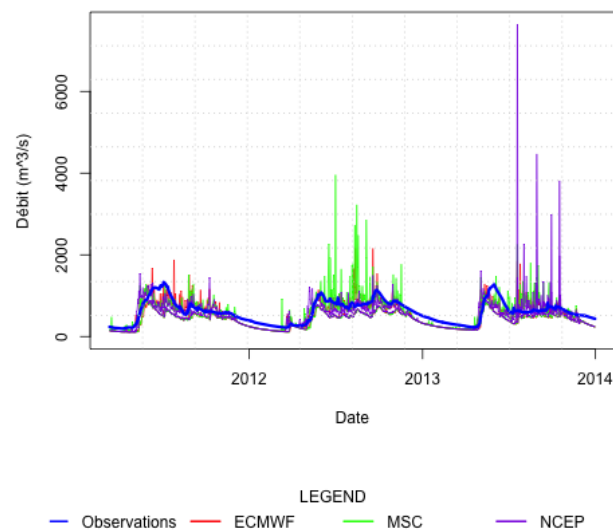


FIGURE 5.48 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à La Grande 4 pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

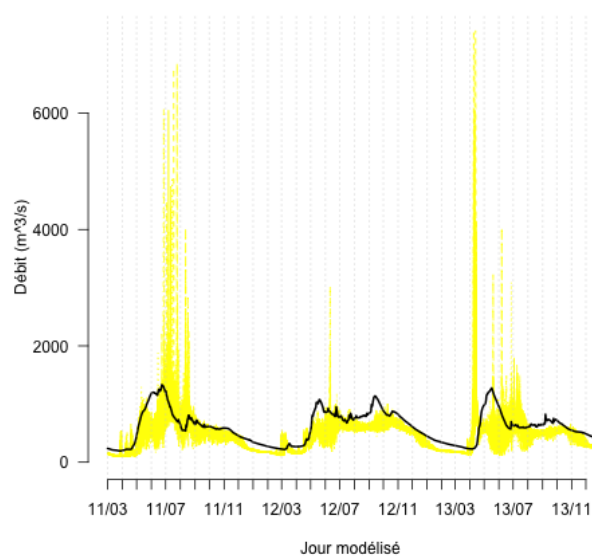


FIGURE 5.49 – Graphique spaghetti des apports à La Grande 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

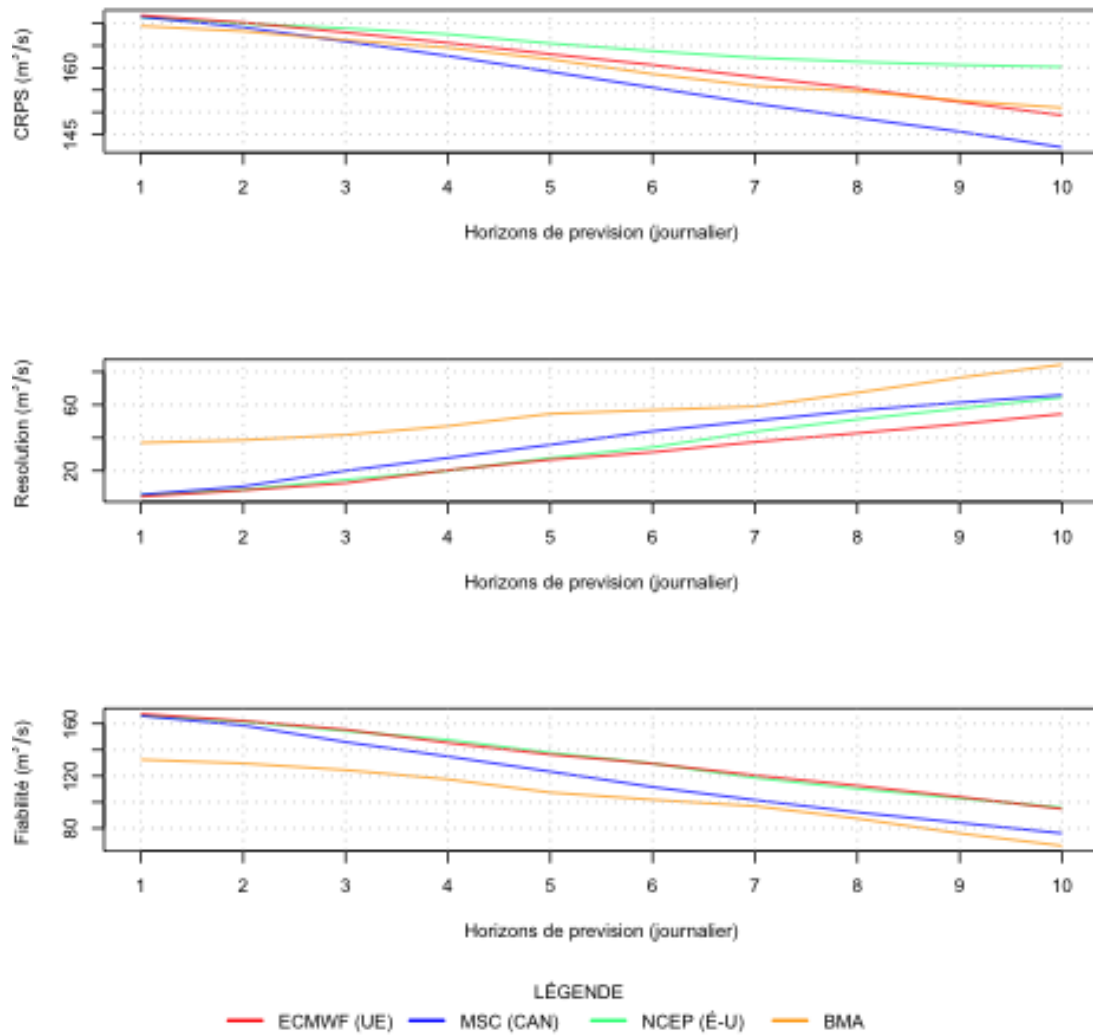


FIGURE 5.50 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de La Grande-4 pour chaque horizon de prévision

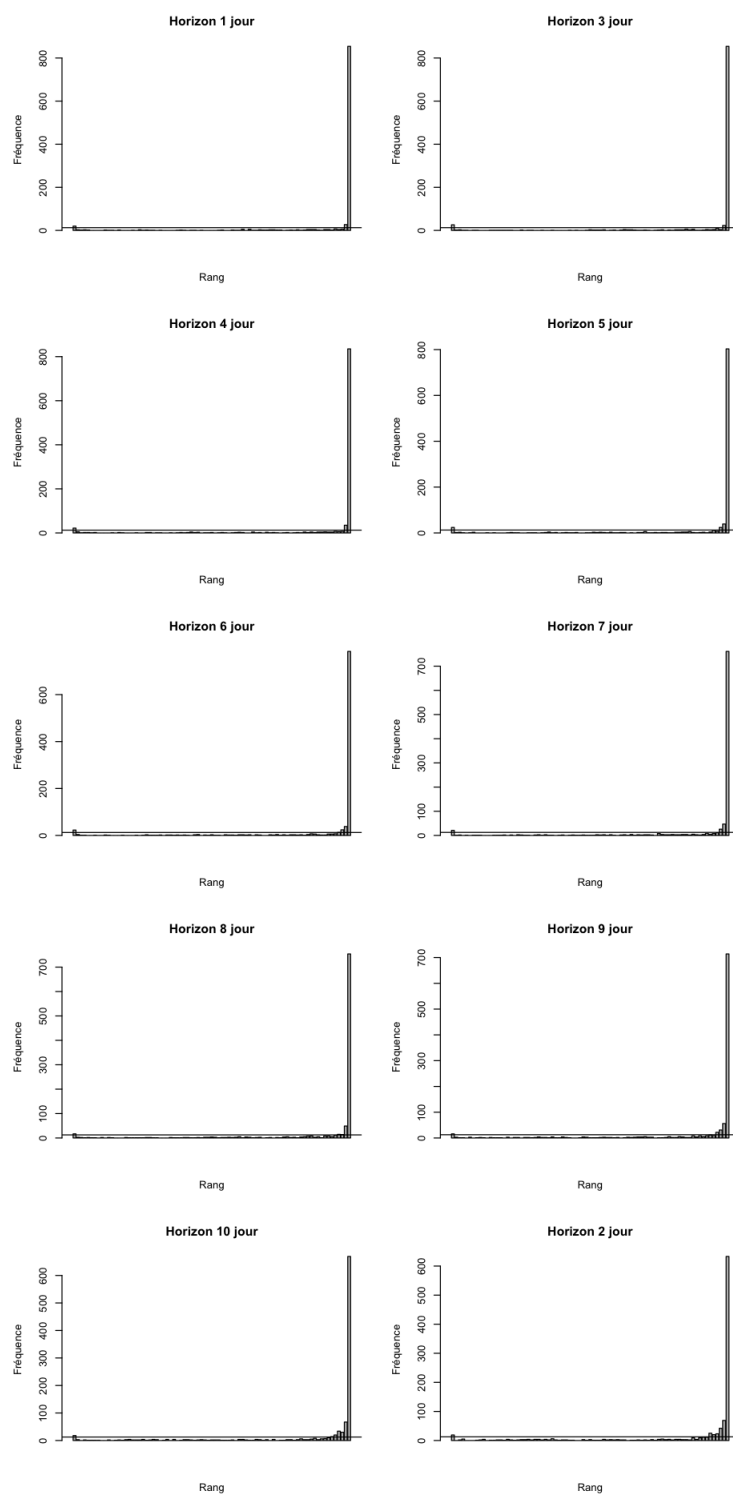


FIGURE 5.51 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA normal pour La Grande-4 de 2011 à 2013

5.3.3 Outardes 4

Les prévisions pré-traitées pour Outardes 4 dressent un meilleur portrait de l'incertitude sur les observations de débit (figures 5.52, 5.54 et 5.56) que les prévisions hydrologiques brutes.

Le post-traitement BMA normal offre un contour qui épouse bien la forme des hydrogrammes prévus, et ce pour tous les horizons de prévision. D'autre part, il convient de remarquer l'évolution de la pointe de débit prévue pour 2011, il y a une augmentation de la couverture de la prévision proportionnellement à l'horizon de prévision (figures 5.52, 5.54 et 5.56).

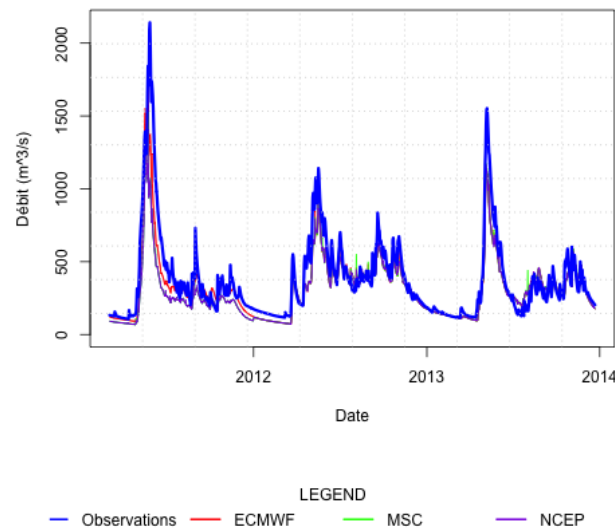


FIGURE 5.52 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

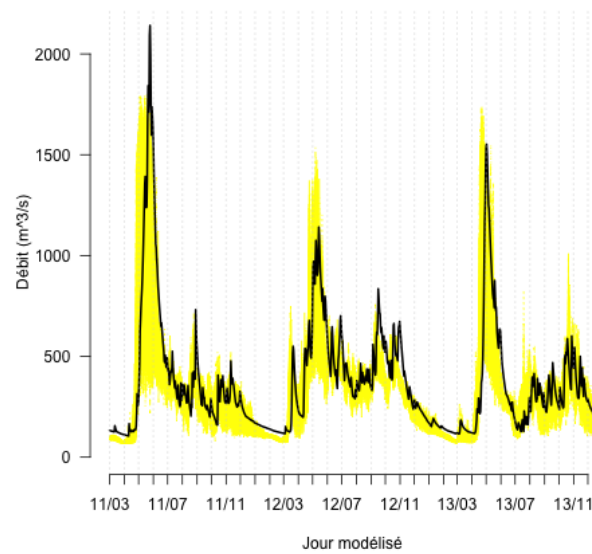


FIGURE 5.53 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 1 jour

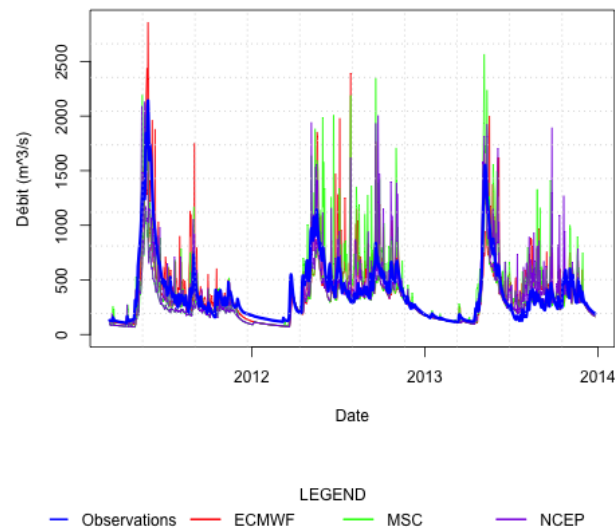


FIGURE 5.54 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

Le post-traitement BMA normal (figure 5.58) n'a pas été aussi performant que le BMA gamma (figure 5.35) en termes de CRPS, même si ce dernier était appliqué sur l'ensemble brut. D'autre part, le diagramme de rang correspondant au post-traitement

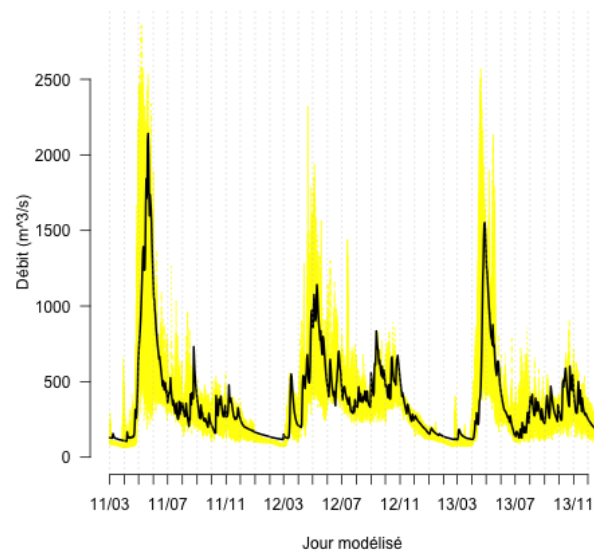


FIGURE 5.55 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 5 jour

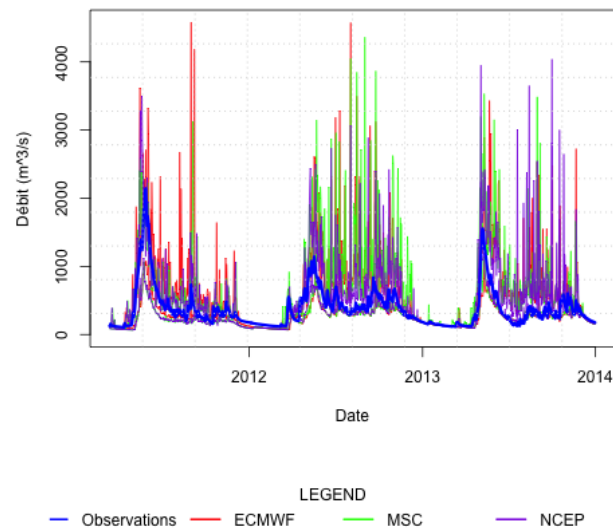


FIGURE 5.56 – Graphique spaghetti des apports pré-traités à Outardes 4 pour les années 2011 à 2013 à l'horizon 10 jour

par BMA normal exhibe encore un biais de sous-estimation de la prévision.

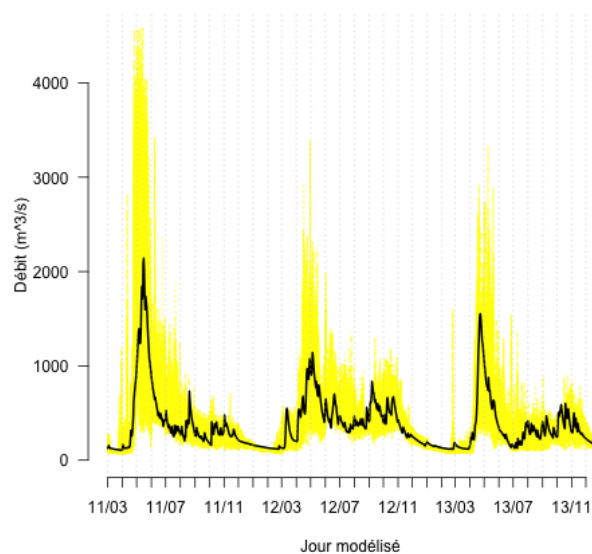


FIGURE 5.57 – Graphique spaghetti des apports à Outardes 4 post-traités avec le BMA normal pour les années 2011 à 2013 à l’horizon 10 jour

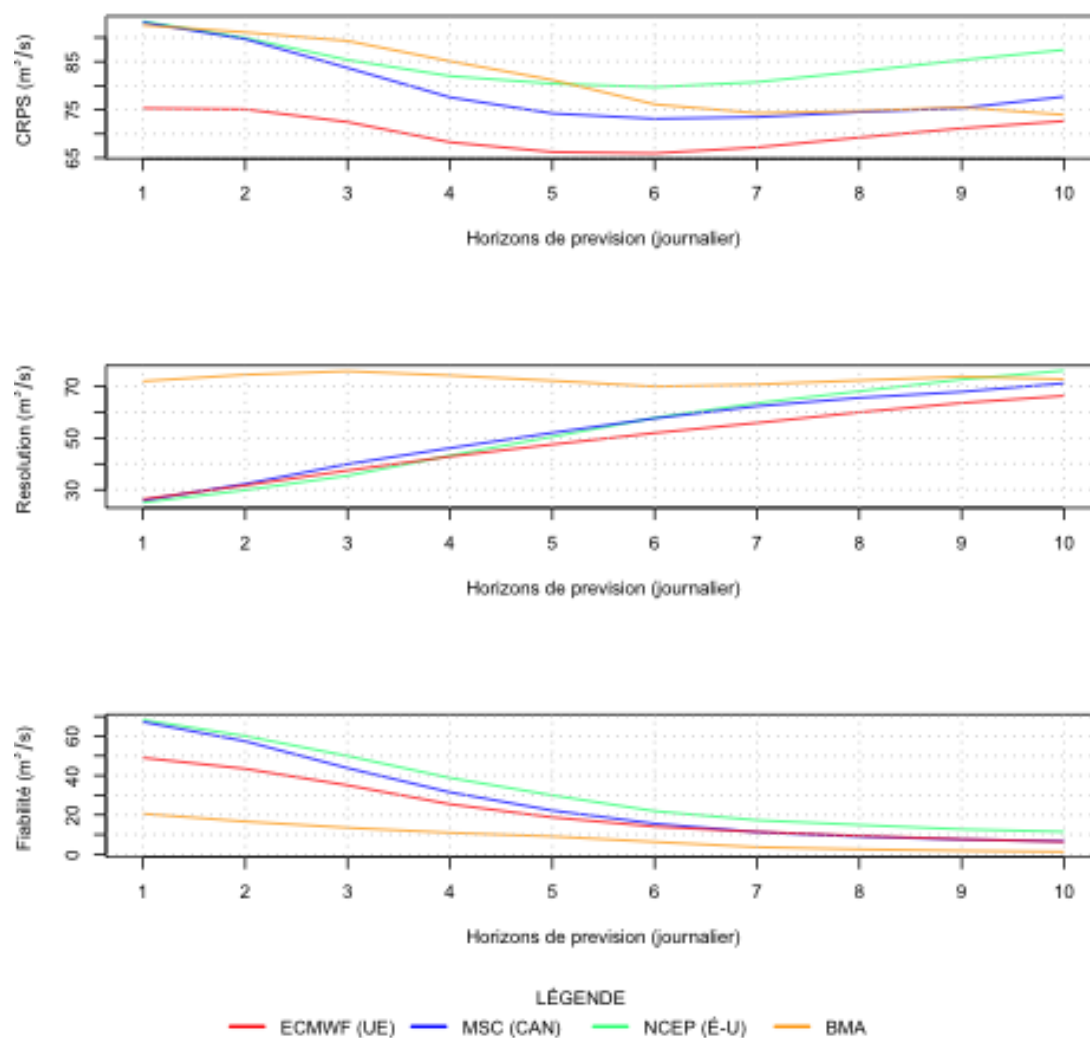


FIGURE 5.58 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions hydrologiques brutes et après BMA normal de Outades 4 pour chaque horizon de prévision

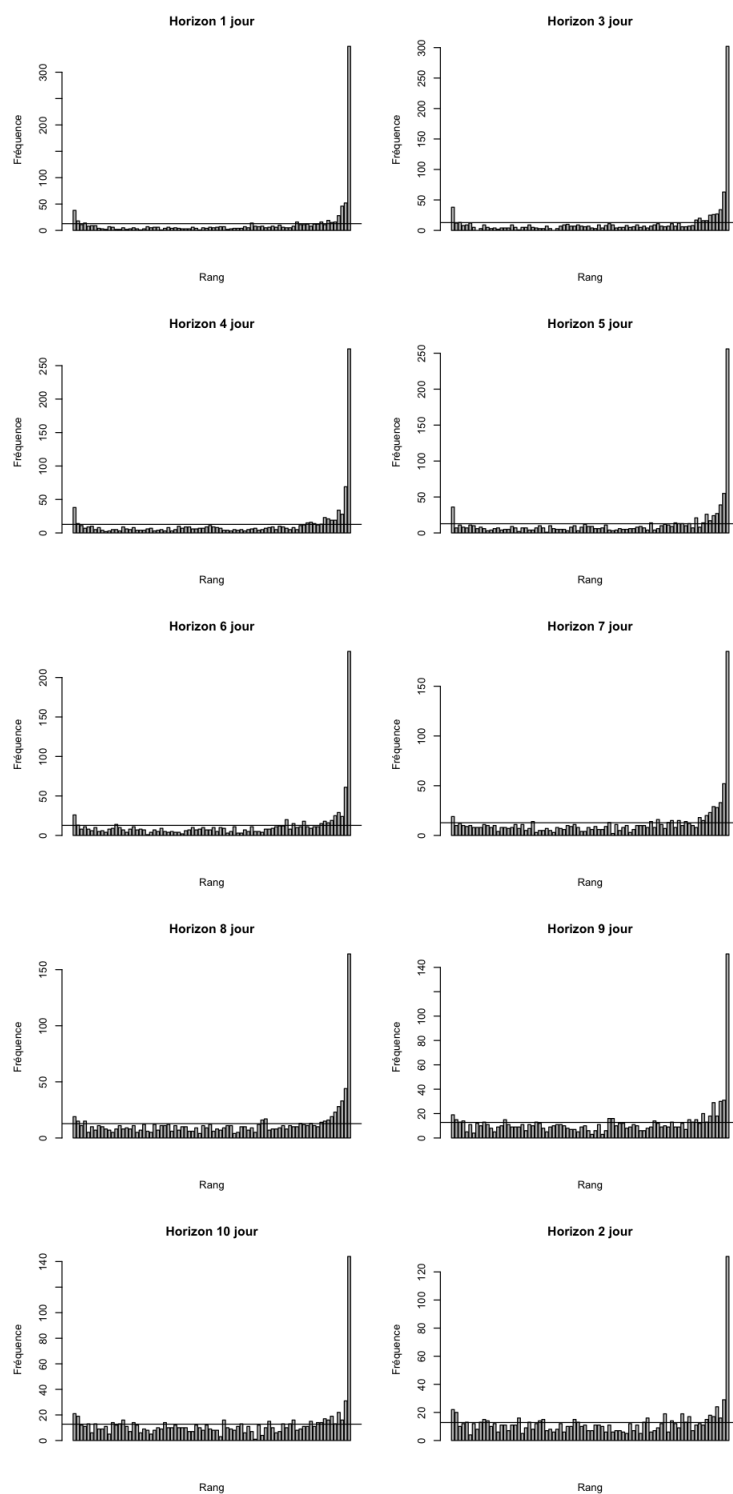


FIGURE 5.59 – Histogramme de rang pour les prévisions obtenues après post-traitement à l'aide du BMA normal pour Outardes 4 de 2011 à 2013

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

L'amélioration des prévisions météorologiques à court et à moyen terme au cours des dernières années permet d'espérer que les prévisions d'ensemble seront utiles dans un contexte d'hydrologie d'exploitation. Il est important pour la gestion de la ressource hydrique de pouvoir repousser les horizons prévisionnels afin de pouvoir capter des signaux d'événements météorologiques d'importance. La plus value des prévisions d'ensemble à court et à moyen terme est l'information sur l'incertitude attribuable au modèle météorologique.

Les constats établis dans le cadre de ce mémoire au niveau de la prévision météorologique sont les suivants :

- Les prévisions de température maximale issues du MSC (Canada) sont très performantes.
- Certains membres peuvent prévoir des événements aberrants. Il faudrait établir une méthode formelle d'identification de ces cas.

Les prévisions hydrologiques d'ensemble brutes sont sous-dispersées et comportent un biais. Ceci peut être dû aux limitations en termes de modélisation hydrologique et de représentativité spatiale des conditions météorologiques. De plus, les prévisions d'ensemble ne montrent pas de dispersion aux horizons à court-terme. Ceci est en partie dû au fait que l'incertitude sur les variables d'état du modèle hydrologique n'est pas représentée. À court-terme, les prévisions d'ensemble n'ont pas assez de variabilité afin de créer différentes réponses hydrologiques de la part du modèle hydrologique.

Les recommandations au niveau de la prévision hydrologique d'ensemble brute et post-traitée avec le BMA sont les suivantes :

- La plus grande source d'incertitude hydrologique à court-terme est attribuée aux variables d'état du modèle. C'est pour cela que la prévision hydrologique brute s'améliore en termes de CRPS au-delà d'un horizon de trois jours.
- Le BMA améliore la fiabilité des prévisions multi-modèle au dépend de leur résolution.
- L'ajustement gamma nécessite un ajustement de la tolérance à la baisse pour pouvoir converger. L'ajustement normal n'en nécessite pas, il est cependant plus

long à converger.

- L’ajustement de type gamma a mieux calibré les prévisions brutes qui étaient très dispersées à la base.
- Les variations dans les poids attribués aux membres le BMA sont proportionnelles à la tolérance de l’ajustement de l’algorithme EM. Par exemple, les poids ajustés pour la loi normale sont beaucoup plus variables que celles de la loi gamma (Voir figures [B.1](#) et [B.2](#)).

Ce projet ne porte que sur une partie du processus de post-traitement, il faudrait ensuite procéder à des travaux pour lier la corrélation spatiotemporelle des prévisions que ce soit avant ou après le forçage des prévisions météorologique dans le modèle hydrologique. En fait, plusieurs études font état de pré-traitement et post-traitement des prévisions hydrologiques (ex. : ([Kang et al., 2010](#)) et ([Verkade, Brown, Reggiani, & Weerts, 2007](#))). Les traitements n’amènent pas toujours à des améliorations significatives en terme de performance. Cependant, il serait intéressant d’essayer de recréer la cohérence temporelle en utilisant la méthode ECC (Ensemble Copula Coupling) ([Schefzik, Thorarinsdottir, Gneiting, et al., 2013](#)). Cette méthode basée sur les données courantes et non sur l’historique comme le ‘Schaake Shuffle’ (e.g : ([Clark, Gangopadhyay, Hay, Rajagopalan, & Wilby, 2004](#))), a déjà été appliquée avec succès a recréer la dépendance entre les distributions marginales du BMA pour différents horizons de prévisions, et ce pour plusieurs variables météorologiques ([Möller, Lenkoski, & Thorarinsdottir, 2013](#)). Toutefois, cette méthode n’a pas été appliquée aux prévisions hydrologiques. Son application ne nécessiterait pas un grand traitement additionnel car il s’agit de relier des distributions uni-variées de débit à différents horizons en préservant les statistiques d’ordre des prévisions brutes dans les prévisions post-traitées.

Malgré la nature multidimensionnelle des entrées d’un modèle hydrologique, la sortie est unidimensionnelle pour un modèle conceptuel et global comme HSAMI. Il serait important de lier le post-traitement BMA selon une analyse multi-variée considérant la dimensionalité et la temporalité des prévisions météorologiques. Très peu d’études s’intéressent à ce sujet. Il serait également intéressant de donner suite à un post-traitement de la précipitation avant de lancer le modèle hydrologique. Cette approche a déjà été appliquée avec succès ([Liu & Xie, 2014](#)).

Une autre avenue intéressante à explorer c’est de modifier le BMA pour en faire une méthode moins rigide à travers l’utilisation de modèles non paramétriques d’estimation de densités ([Silverman, 1986](#)). De plus, il serait intéressant de définir une méthode pour lier la définition des poids de la BMA à travers les horizons de prévision. Par exemple, la pondération finale après convergence du BMA pour l’horizon $j + 1$ pourrait servir de point de départ pour l’ajustement à l’horizon $j + 2$ à la place de définir toujours les poids initiaux comme étant le rapport entre le nombre de membres d’un modèle sur le total des membres disponibles.

Dans le cadre de cette recherche, le toolbox R ensembleBMA a été utilisé tel quel.

Ceci fait en sorte qu’une fenêtre mobile doit être utilisée pour estimer les paramètres du post-traitement. Il serait bien, éventuellement, de modifier le toolbox de façon à pouvoir l’appliquer autrement. Par exemple il serait intéressant de pouvoir séparer les prévisions en différentes catégories sur la base de percentiles calculés sur la distribution des observations, comme ce qui a été présenté par (Boucher et al., 2015). L’utilisation d’une fenêtre mobile ne permet pas cela et peut au contraire mener à estimer un seul jeu de paramètres pour des débits correspondants à des phénomènes différents (étiage hivernal vs crue printanière).

Un autre aspect important à ne pas négliger est la gestion des données lorsque l’on veut établir un système de prévision hydrologique opérationnel probabiliste. En premier lieu, il faut maîtriser les outils nécessaires au téléchargement et à la modification des fichiers binaires. En fait, sans édition préalable, les fichiers binaires pour des prévisions d’ensemble quotidiennes pour un horizon de 10 jours peuvent atteindre plus d’une dizaine de gigaoctets par jour. Il a été également nécessaire de paralléliser les ajustements du BMA dans une grappe de serveurs, sans quoi il aurait été très long d’arriver à la convergence des calculs.

Finalement, les résultats de cette maîtrise démontrent qu’il y a une plus value à aller chercher en considérant l’incertitude liée à la prévision météorologique. On juge que l’occurrence d’évènements extrêmes sera mieux représentée qu’en utilisant des prévisions qui considèrent les observations passées garantes du futur alors qu’on est en contexte de non-stationarité du climat. De plus, l’utilisation du BMA en hydrologie présente des avenues intéressantes d’amélioration de la méthode. Les gains en fiabilité obtenus montrent que c’est une méthode qui peut-être profitable dans un système de prévision probabiliste opérationnel si des modifications propres au contexte de l’hydrologie sont faits en plus de corriger la cohérence temporelle avec une méthode de copules par exemple.

Annexe A

Prévisions météorologiques brutes

A.1 Baskatong

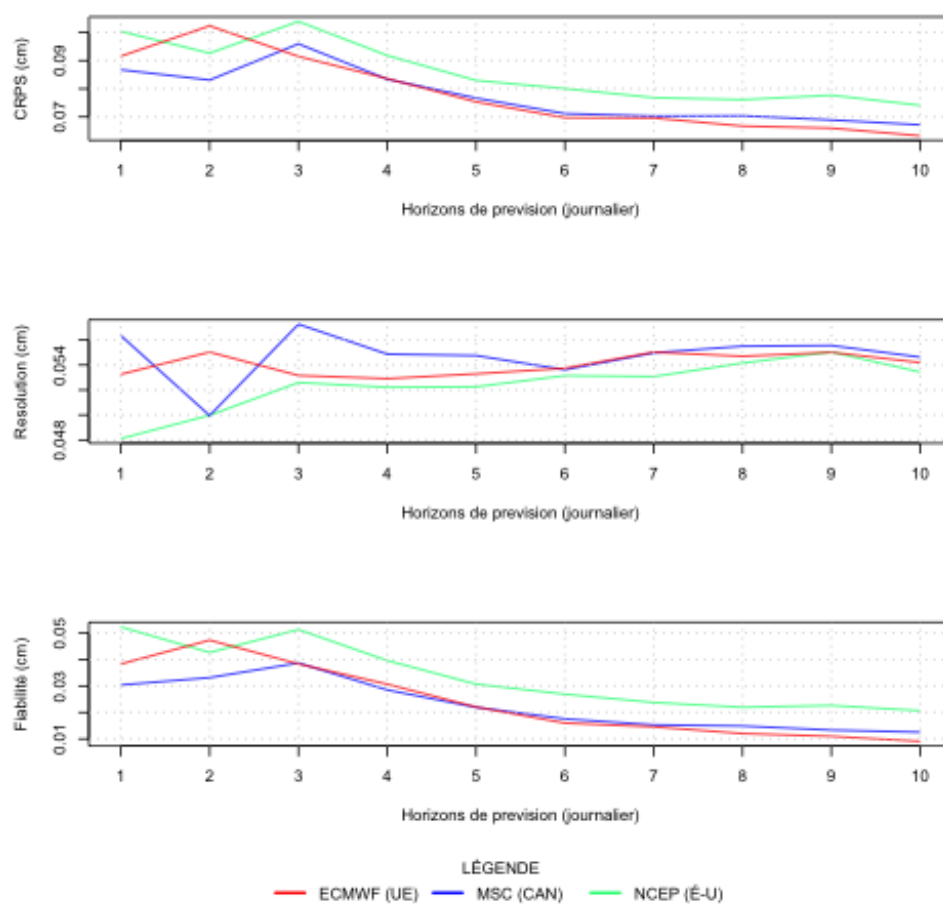


FIGURE A.1 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige de Baskatong

A.2 Outardes 4

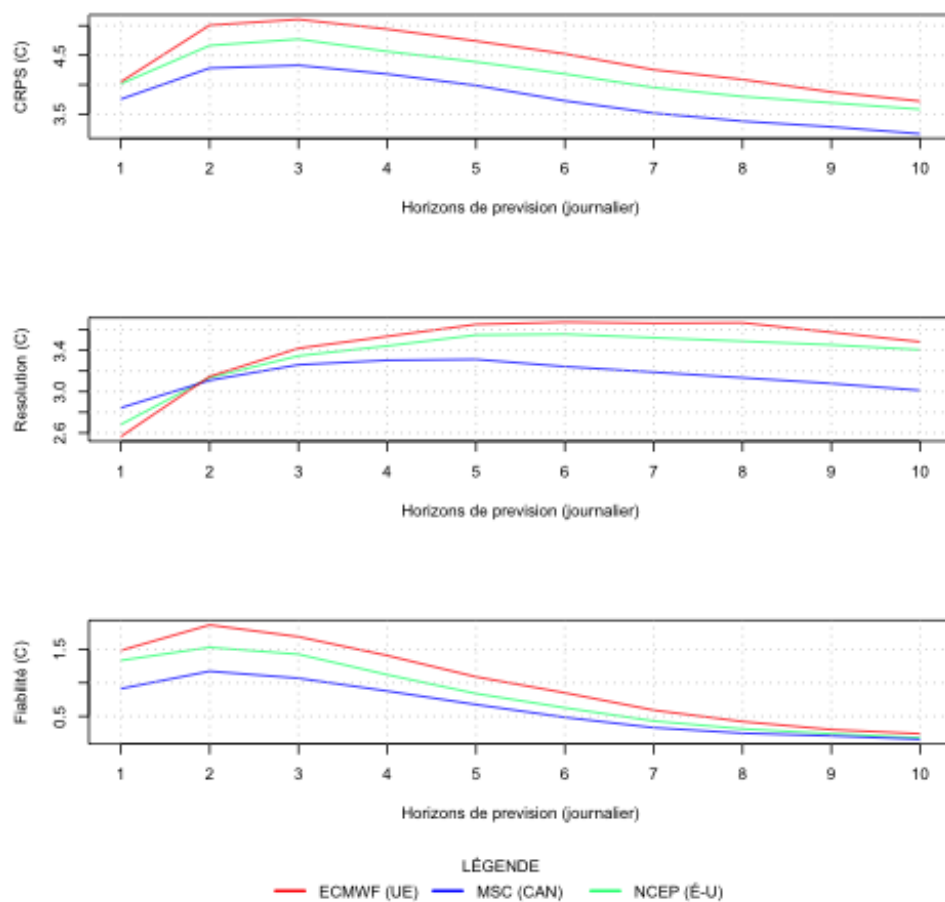


FIGURE A.2 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température maximale pour Outardes 4

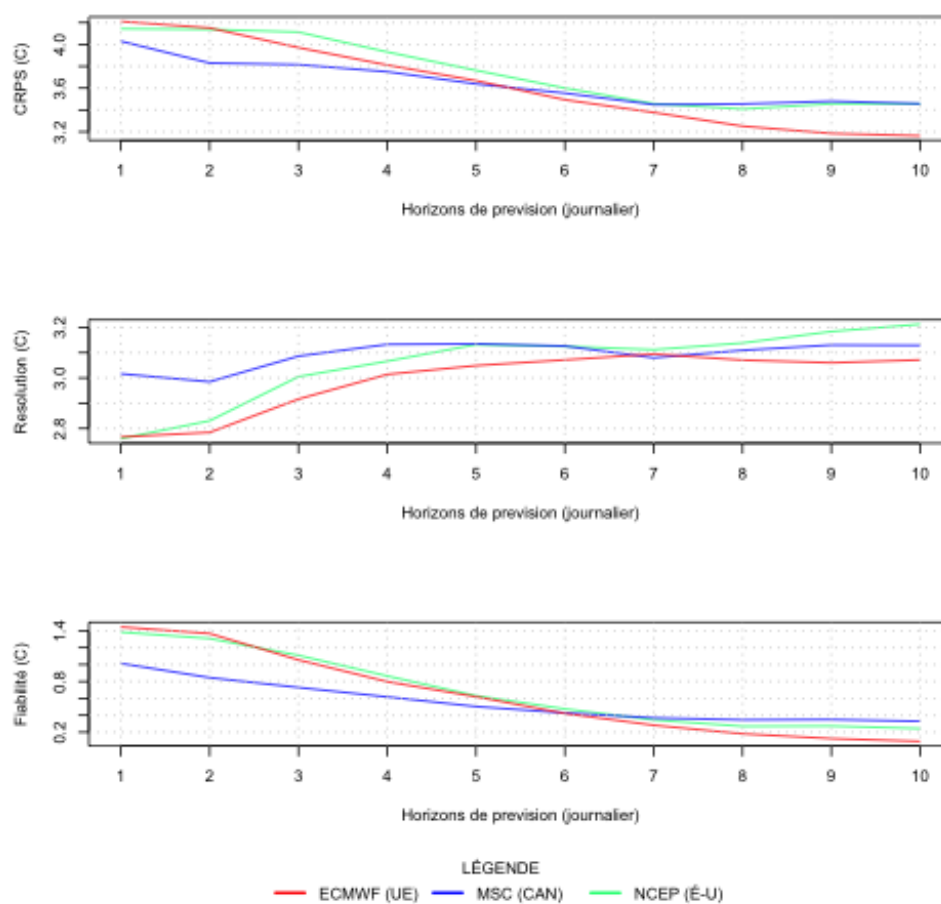


FIGURE A.3 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de température minimale pour Outardes 4

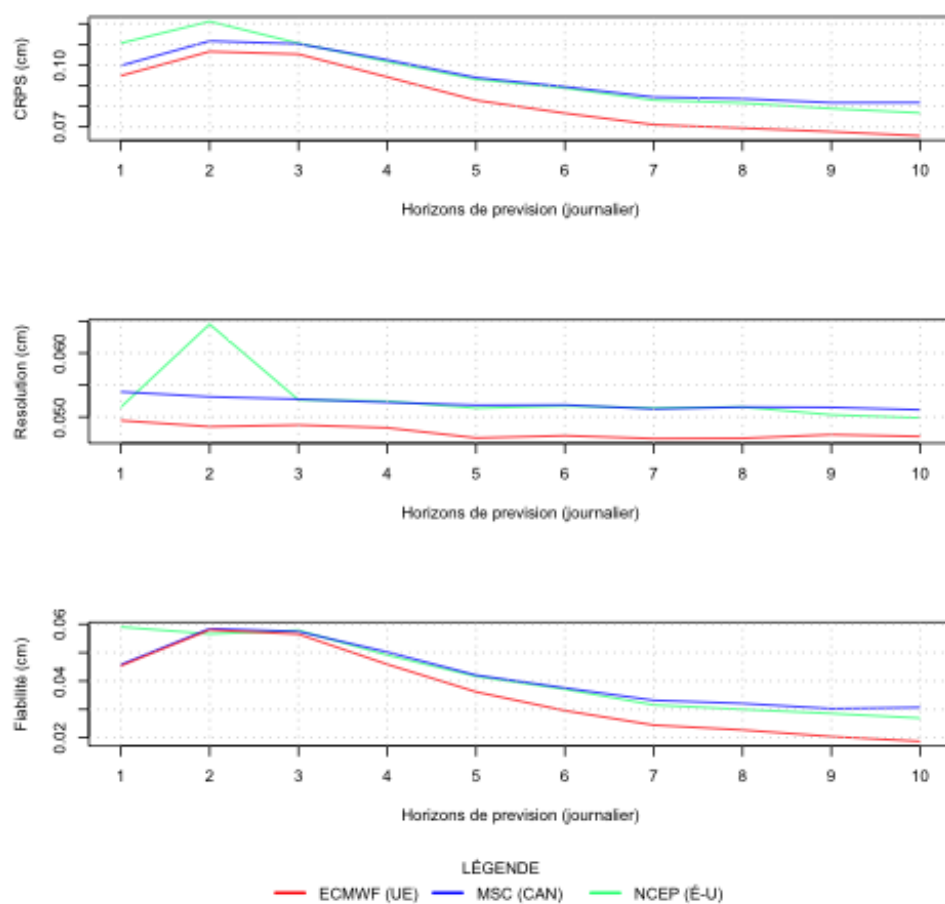


FIGURE A.4 – Comparaison des valeurs de CRPS décomposé pour les prévisions de neige pour Outardes 4

Annexe B

Poids du BMA

B.1 Outardes 4

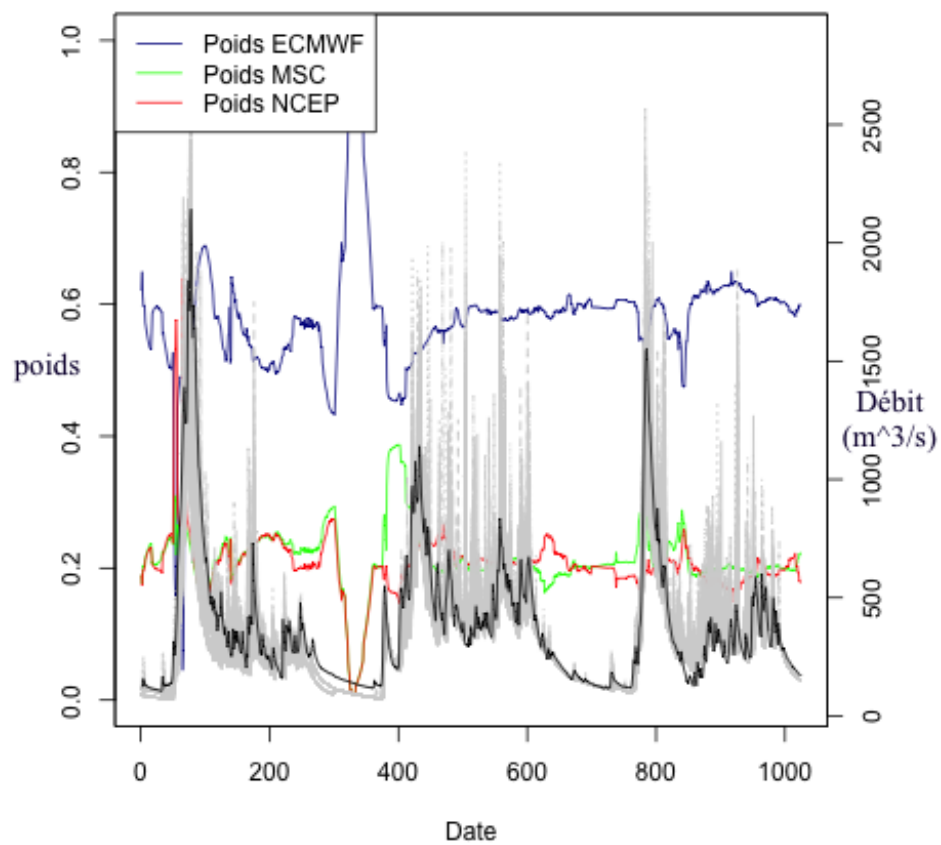


FIGURE B.1 – Comparaison des valeurs des poids du BMA gamma, des hydrographes prévus et de l’hydrogramme observé pour le jour 5 à Outardes 4

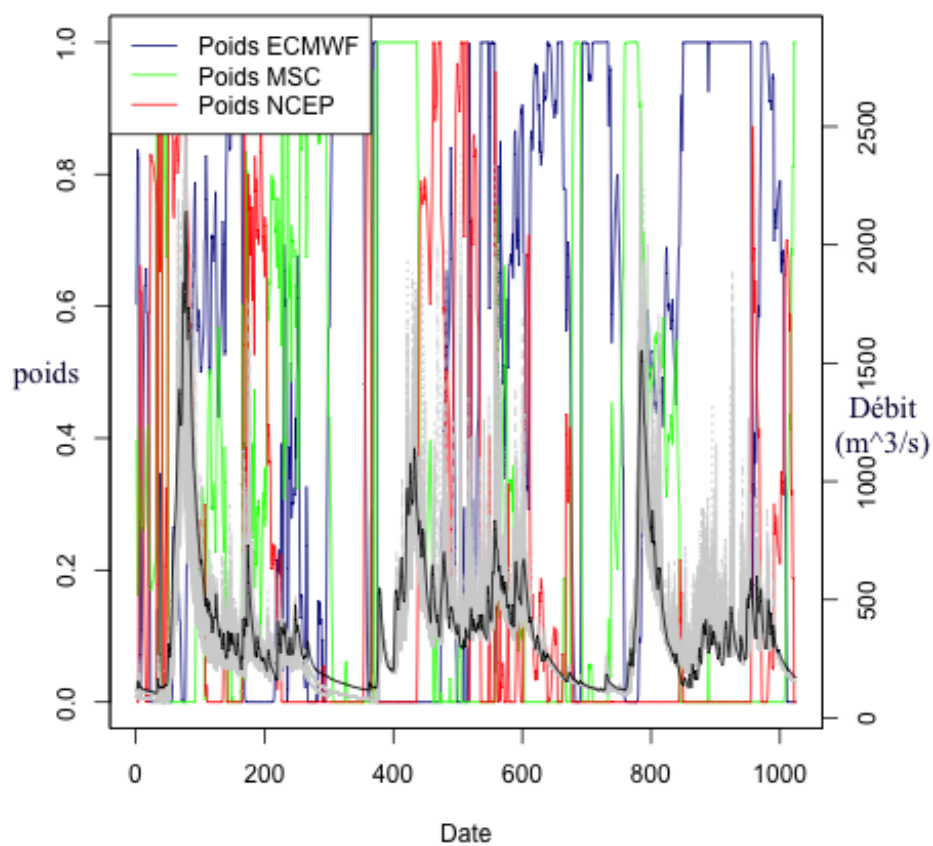


FIGURE B.2 – Comparaison des valeurs des poids du BMA normal, des hydrogrammes prévus et de l'hydrogramme observé pour le jour 5 à Outardes 4

Références

- Alfieri, L., Thielen, J., & Pappenberger, F. (2012). Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern switzerland. *Journal of Hydrology*, 424, 143–153.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., & Lavabre, J. (2001). Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250(1), 206–223.
- Bartholmes, J., Thielen, J., Ramos, M., & Gentilini, S. (2009). The european flood alert system EFAS - Part 2 : Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 141–153.
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1), 11–29.
- Bisson, J., & Roberge, F. (1983). Prévission des apports naturels : Expérience d’Hydro-Québec. *Proceedings of the Workshop on the Streamflow Forecast, Toronto, Canada*.
- Bogner, K., Pappenberger, F., & Cloke, H. (2012). Technical note : The normal quantile transformation and its application in a flood forecasting system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1085–1094.
- Boucher, M.-A., Perreault, L., Anctil, F., & Favre, A.-C. (2015). Exploratory analysis of statistical post-processing methods for hydrological ensemble forecasts. *Hydrological Processes*, 29(6), 1141–1155.
- Boucher, M.-A., Tremblay, D., Delorme, L., Perreault, L., & Anctil, F. (2012). Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. *Journal of Hydrology*, 416, 133–144.
- Brânzei, R., Tijds, S., & Timmer, J. (2001). Collecting information to improve decision-making. *International Game Theory Review*, 3(01), 1–12.
- Buizza, R. (2008). The value of probabilistic prediction. *Atmospheric Science Letters*, 9(2), 36–42.
- Charney, J. G. (1948). On the scale of atmospheric motions. *Geofys. Publikasjoner Norske Videnskaps-Akaps.*
- Choi, H. T., & Beven, K. (2007). Multi-period and multi-criteria model conditioning to

- reduce prediction uncertainty in an application of TOPMODEL within the GLUE framework. *Journal of Hydrology*, 332(3), 316–336.
- Clark, M., Gangopadhyay, S., Hay, L., Rajagopalan, B., & Wilby, R. (2004). The schaaake shuffle : A method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, 5(1), 243–262.
- Cloke, H., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting : a review. *Journal of Hydrology*, 375(3), 613–626.
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., & Staniforth, A. (1998). The operational CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I : Design considerations and formulation. *Monthly Weather Review*, 126(6), 1373–1395.
- Demeritt, D., Nobert, S., Cloke, H., & Pappenberger, F. (2010). Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological Applications*, 17(2), 209–222.
- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1–38.
- Duan, Q., Ajami, N. K., Gao, X., & Sorooshian, S. (2007). Multi-model ensemble hydrologic prediction using bayesian model averaging. *Advances in Water Resources*, 30(5), 1371–1386.
- Evora, N. (2005). *Valorisation des prévisions météorologiques d'ensemble* (Rapport technique). Institut de recherche d'Hydro-Quebec.
- Fortin, J., Moussa, R., Bocquillon, C., & Villeneuve, J. (1995). Hydrotel, a distributed hydrological model compatible with remote sensing and geographical information systems. *Revue des Sciences de l'Eau/Journal of Water Science*, 8(1), 97–124.
- Fortin, V. (2000). *Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application* (Rapport technique). Institut de recherche d'Hydro-Quebec.
- Fortin, V., Favre, A.-C., & Said, M. (2006). Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems : Improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(617), 1349–1369.
- Fortin, V., & Turcotte, R. (2006). Le modèle hydrologique MOHYSE. *Note de cours pour SCA7420, Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal, Vol. 23*.
- Fraley, C., Raftery, A. E., & Gneiting, T. (2010). Calibrating multimodel forecast ensembles with exchangeable and missing members using bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 138(1), 190–202.
- Fraley, C., Raftery, A. E., Gneiting, T., & Sloughter, J. M. (2007). *Ensemblebma : An R package for probabilistic forecasting using ensembles and bayesian model averaging*

- (Rapport technique). DTIC Document.
- Gauckler, P. (1867). *Etudes théoriques et pratiques sur l'écoulement et le mouvement des eaux*. Gauthier-Villars.
- Girad, G., Morin, G., & Charbonneau, R. (1973). Utilisation d'un modèle de fonte de neige à mailles physiographiques. *Hydrological Sciences Journal*, 18(1), 27–32.
- Girard, G., Charbonneau, R., & Morin, G. (1972). Modèle hydrophysiographique. In *Compte rendu du symposium international sur les techniques de modèles mathématiques appliqués aux systèmes de ressources en eau* (pp. 190–204).
- Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Raftery, A. E. (2007). Probabilistic forecasts, calibration and sharpness. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Statistical Methodology)*, 69(2), 243–268.
- Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2005). Weather forecasting with ensemble methods. *Science*, 310(5746), 248–249.
- Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2007). Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 102(477), 359–378.
- Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F. J., & Palmer, T. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting—I. Basic concept. *Tellus A*, 57(3), 219–233.
- Hamill, T. M. (1997). Reliability diagrams for multicategory probabilistic forecasts. *Weather and forecasting*, 12(4), 736–741.
- Hamill, T. M. (2001). Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 129(3), 550–560.
- Hamill, T. M., & Colucci, S. J. (1997). Verification of eta-rsm short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 125(6), 1312–1327.
- He, Y., Wetterhall, F., Bao, H., Cloke, H., Li, Z., Pappenberger, F., ... Huang, Y. (2010). Ensemble forecasting using TIGGE for the july–september 2008 floods in the Upper Huai catchment : a case study. *Atmospheric Science Letters*, 11(2), 132–138.
- Heideman, K. F., Stewart, T. R., Moninger, W. R., & Reagan-Cirincione, P. (1993). The weather information and skill experiment (wise) : The effect of varying levels of information on forecast skill. *Weather and Forecasting*, 8(1), 25–36.
- Hersbach, H. (2000). Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Weather and Forecasting*, 15(5), 559–570.
- Houdant, B. (2004). *Contribution à l'amélioration de la prévision hydrométéorologique opérationnelle. pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs*. (Thèse de doctorat non publiée). ENGREF (AgroParisTech).
- Houtekamer, P., Lefaiivre, L., Derome, J., Ritchie, H., & Mitchell, H. L. (1996). A system simulation approach to ensemble prediction. *Monthly Weather Review*, 124(6), 1225–1242.
- Hydro-Québec. (17 janvier 2013). *Prévision météorologique probabiliste à hqp* (Rapport

- technique). Hydro-Quebec Production.
- Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q., Huo, Z., & Huang, G. (2015). Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle heihe river basin using a distributed agro-hydrological model. *Agricultural Water Management*, 147, 67–81.
- Kang, T., Kim, Y., & Hong, I. (2010). Comparison of pre- and post-processors for ensemble streamflow prediction. *Atmospheric Science Letters*, 11(2), 153–159. doi: 10.1002/asl.276
- Kharin, V. V., & Zwiers, F. W. (2002). Climate predictions with multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 15(7), 793–799.
- Krzysztofowicz, R. (1997). Transformation and normalization of variates with specified distributions. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 286–292.
- Krzysztofowicz, R. (1999). Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, 35(9), 2739–2750.
- Krzysztofowicz, R. (2001). The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, 249(1), 2–9.
- Liu, J., & Xie, Z. (2014). BMA probabilistic quantitative precipitation forecasting over the huaihe basin using TIGGE multimodel ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 142(4), 1542–1555.
- Lloyd-Davies, D. E., Jones, A., & Travis, W. (1906). *The elimination of storm-water from sewerage systems*. Inst.[of Civil Eng.].
- Lorenz, E. N. (1963). *The essence of chaos*. University of Washington Press.
- Manning, R., Griffith, J. P., Pigot, T., & Vernon-Harcourt, L. F. (1890). *On the flow of water in open channels and pipes*.
- Matheson, J. E., & Winkler, R. L. (1976). Scoring rules for continuous probability distributions. *Management Science*, 22(10), 1087–1096.
- Melching, C. (1992). An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 132(1), 157–177.
- Merz, R., Parajka, J., & Blöschl, G. (2009). Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water resources research*, 45(9).
- Meuer, H., Strohmaier, E., Simon, H., & Dongarra, J. (2013). *June 2013| top500 supercomputer sites*.
- Möller, A., Lenkoski, A., & Thorarinsdottir, T. L. (2013). Multivariate probabilistic forecasting using ensemble bayesian model averaging and copulas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(673), 982–991.
- Montanari, A. (2005). Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 41(8).
- Moors, E. J., Grimmond, C., Veldhuizen, A., Järvi, L., & van der Bolt, F. (2015). Urban water balance and hydrology models to support sustainable urban planning.

- In *Understanding urban metabolism : A tool for urban planning* (pp. 106–117). Routledge.
- Morin, G., Paquet, P., & Sochanski, W. (1995). Le modèle de simulation de quantité et de qualité cequeau, manuel de références. *INRS Eau Rapport de Recherche No, 433*.
- Mulvaney, T. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland*, 4(2), 18–33.
- Nash, J., et al. (1960). A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments. In *Ice proceedings* (Vol. 17, pp. 249–282).
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Neuman, S. (2003). Maximum likelihood bayesian averaging of uncertain model predictions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17(5), 291–305.
- N. Gagnon, P. H. M. C. A. E. S. B. B. A. F. P. e. A. G., X.-X. Deng. (2007). *Amélioration du système global de prévision d'ensemble (sgpe) de la version 2.0.3 à la version 3.0.0* (Rapport technique). Environnement Canada.
- Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., & Michel, C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7).
- Palmer, T., Andersen, U., Cantelaube, P., Davey, M., Deque, M., Doblas-Reyes, F., ... others (2004). Development of a european multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (demeter). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(6), 853–872.
- Pappenberger, F., & Beven, K. J. (2006). Ignorance is bliss : Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42(5).
- Peng, P., Kumar, A., van den Dool, H., & Barnston, A. G. (2002). An analysis of multi-model ensemble predictions for seasonal climate anomalies. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres (1984–2012)*, 107(D23), ACL–18.
- Perrault, L. (Décembre 2013). *Vérification de prévisions hydrologiques probabilistes* (Rapport technique N° IREQ-2013-0149). IREQ.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3), 275–301.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275–289.
- Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005). Using bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155–1174.
- Rasouli, K., Pomeroy, J. W., Janowicz, J. R., Carey, S. K., & Williams, T. J. (2014).

- Hydrological sensitivity of a northern mountain basin to climate change. *Hydrological Processes*.
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 69–97.
- Richardson, L. (1922). {Weather Prediction by Numerical Process}.
- Roulston, M., & Smith, L. A. (2003). Combining dynamical and statistical ensembles. *Tellus A*, 55(1), 16–30.
- Schaake, J., & Buizza, R. (2014). "hepex 10 years ago : Did the vision come true?" [Blog]. <http://hepex.irstea.fr/hepex-10-years-ago-did-the-vision-come-true/>.
- Schaake, J., Demargne, J., Hartman, R., Mullusky, M., Welles, E., Wu, L., ... others (2007). Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, 4(2), 655–717.
- Schefzik, R., Thorarinsdottir, T. L., Gneiting, T., et al. (2013). Uncertainty quantification in complex simulation models using ensemble copula coupling. *Statistical Science*, 28(4), 616–640.
- Shamseldin, A. Y., O'Connor, K. M., & Liang, G. (1997). Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 203–229.
- Sherman, L. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. *Transactions, American Geophysical Union*, 13, 332–339.
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis* (Vol. 26). CRC press.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270–292.
- Sloughter, J. M., Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2010). Probabilistic wind speed forecasting using ensembles and bayesian model averaging. *Journal of the American Statistical Association*, 105(489), 25–35.
- Song, X., Zhan, C., Kong, F., & Xia, J. (2011). Advances in the study of uncertainty quantification of large-scale hydrological modeling system. *Journal of Geographical Sciences*, 21(5), 801–819.
- Sood, A., & Smakhtin, V. (2014). Global hydrological models : a review. *Hydrological Sciences Journal*(just-accepted).
- Székel, G. J., & Rizzo, M. L. (2005). A new test for multivariate normality. *Journal of Multivariate Analysis*, 93(1), 58–80.
- Talagrand, O., Vautard, R., & Strauss, B. (1997). Evaluation of probabilistic prediction systems. In *Proc. ecmwf workshop on predictability* (pp. 1–25).
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., De Roo, A., et al. (2008). The european flood alert system–part 1 : concept and development. *Hydrology and Earth System*

- Sciences Discussions Discussions*, 5(1), 257–287.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., & Roo, A. d. (2009). The European flood alert system—Part 1 : concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 125–140.
- Todini, E. (2008). A model conditional processor to assess predictive uncertainty in flood forecasting. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), 123–137.
- Toth, Z., & Kalnay, E. (1993). Ensemble forecasting at nmc : The generation of perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(12), 2317–2330.
- Tsonis, A. (1996). Widespread increases in low-frequency variability of precipitation over the past century.
- Tsonis, A. (2004). Is global warming injecting randomness into the climate system ? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(38), 361–364.
- Van den Dool, H. (1989). A new look at weather forecasting through analogues. *Monthly weather review*, 117(10), 2230–2247.
- Velázquez, J., Anctil, F., & Perrin, C. (2010). Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(11), 2303–2317.
- Verkade, J., Brown, J., Reggiani, P., & Weerts, A. (2007). Post-processing ECMWF precipitation and temperature ensemble reforecasts for operational hydrologic forecasting at various spatial scales. *Monthly Weather Review*, 135(6), 2379–2390.
- Wagener, T., & Gupta, H. V. (2005). Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 378–387.
- Wang, X., & Bishop, C. H. (2005). Improvement of ensemble reliability with a new dressing kernel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(607), 965–986.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Wilson, L. J., Beauregard, S., Raftery, A. E., & Verret, R. (2007). Calibrated surface temperature forecasts from the canadian ensemble prediction system using bayesian model averaging. *Monthly Weather Review*, 135(4), 1364–1385.
- Wöhling, T., & Vrugt, J. A. (2008). Combining multiobjective optimization and bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles of soil hydraulic models. *Water resources research*, 44(12).
- Wu, L., Seo, D.-J., Demargne, J., Brown, J. D., Cong, S., & Schaake, J. (2011). Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast for hydrologic ensemble prediction. *Journal of Hydrology*, 399(3), 281–298.

- Younis, J., Ramos, M.-H., & Thielen, J. (2008). Efas forecasts for the march–april 2006 flood in the czech part of the elbe river basin—a case study. *Atmospheric Science Letters*, 9(2), 88–94.
- Zalachori, I., Ramos, M.-H., Garçon, R., Mathevet, T., & Gailhard, J. (2012). Statistical processing of forecasts for hydrological ensemble prediction : a comparative study of different bias correction strategies. *Advances in Science and Research*, 8(1), 135–141.